

Matthias Schneider

**Entwicklung eines generischen Planungs- und
Managementsystems für Verbände heterogener
autonomer maritimer Fahrzeuge**

Entwicklung eines generischen Planungs- und Management- systems für Verbände heterogener autonomer maritimer Fahrzeuge

Matthias Schneider



Universitätsverlag Ilmenau
2012

Impressum

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Angaben sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Diese Arbeit hat der Fakultät für Informatik und Automatisierung der Technischen Universität Ilmenau als Dissertation vorgelegen.

Tag der Einreichung: 4. Juli 2011

1. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christoph Ament
(TU Ilmenau)

2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Rauschenbach
(Fraunhofer Anwendungszentrum Systemtechnik (AST), Ilmenau)

3. Gutachter: Dr. rer. nat. Konstantinos Siantidis
(Atlas Elektronik GmbH, Bremen)

Tag der Verteidigung: 24. Oktober 2011

Technische Universität Ilmenau/Universitätsbibliothek

Universitätsverlag Ilmenau

Postfach 10 05 65

98684 Ilmenau

www.tu-ilmenau.de/universitaetsverlag

Herstellung und Auslieferung

Verlagshaus Monsenstein und Vannerdat OHG

Am Hawerkamp 31

48155 Münster

www.mv-verlag.de

ISBN 978-3-86360-012-9 (Druckausgabe)

URN [urn:nbn:de:gbv:ilm1-2011000376](http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:gbv:ilm1-2011000376)

Titelfoto: Nico Kaiser, flickr.com (CC BY 2.0)



Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während des durch das sechste Rahmenprogramm der EU geförderten internationalen Kooperationsprojekts GREX. Ich danke dem Konsortium für die hervorragende Zusammenarbeit, die maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beitrug. Vor allem danke ich an dieser Stelle dem Projektkoordinator Dipl.-Ing. Jörg Kalwa, Prof. Antonio Pascoal, M.Sc. João Alves sowie Dr. Thomas Glotzbach.

Des Weiteren danke ich meinem Betreuer Prof. Ament für die Unterstützung sowie die kritischen Hinweise und Anregungen während dem Erstellen der Dissertation.

Für die Übernahme der Koreferate danke ich Prof. Thomas Rauschenbach (Fraunhofer Anwendungszentrum Systemtechnik, Ilmenau) und Dr. Konstantinos Siantidis (ATLAS Elektronik GmbH, Bremen).

Weiterhin danke ich allen Kollegen des Fachgebiets Systemanalyse der Technischen Universität Ilmenau für ihre Ratschläge und Hinweise. Insbesondere Dr. Peter Otto und Dr. Mike Eichhorn danke ich für ihre fachliche Unterstützung sowie die aufschlussreichen Diskussionen.

Für die zahlreichen Ratschläge, das Korrekturlesen sowie ihre Unterstützung bedanke ich mich insbesondere bei Dr. Sven Rebhan, Dipl.-Ing. Christian Schwanengel, Dirk und Conny Schmolinski sowie meinen Eltern, Vera und Siegfried Schneider.

Meiner Lebensgefährtin Bulgantamir und meiner Familie danke ich für ihre Geduld, ihr Interesse und natürlich für den mir zuteil gewordenen Rückhalt.

„We learned a lot...“
GREX-Konsortium, 2009

Kurzfassung

Das stetig wachsende Interesse an der Erforschung und Industrialisierung der Ozeane führt zu immer neuen technischen Aufgaben und Herausforderungen in diesem Bereich. Vor allem die unter Wasser herrschenden extremen Bedingungen begünstigen den Einsatz heterogener autonomer Robotersysteme, welche selbstständig Missionen ausführen können. Diese Arbeit stellt ein neuartiges und umfassendes Konzept zur Missionsplanung und zum Management von Verbänden heterogener autonomer maritimer Fahrzeuge vor, welches die Umsetzung komplexer Missionsszenarios ermöglicht.

Den Schwerpunkt dieser Arbeit bildet ein neuartiges zweistufiges Managementsystem, mit dem sich bestehende einzelautonome Systeme erweitern lassen, um diese kooperiert einsetzen zu können. Auf der Grundlage eines flexibel erweiterbaren Portfolios an Missionselementen ermöglicht es die Koordination von Fahrzeugverbänden, wobei sich die Komplexität einer Manöveraufgabe lediglich auf das entwickelte Teammanagement beschränkt. Weiterhin werden auf Basis eines festen Befehlssatzes die bestehenden einzelautonomen Fähigkeiten der Systeme genutzt, wodurch keine Änderung der fahrzeugeigenen Hard- und Software notwendig ist.

Des Weiteren stellt diese Arbeit ein neu entwickeltes Konzept der Missionsplanung für Fahrzeugverbände vor, welches dem Anwender die Möglichkeit bietet ohne tiefgreifende Vorkenntnisse komplexe Teammissionen planen zu können. In diesem Zusammenhang wird ein neuartiges Konzept zum formationstreuem Ausweichen bekannter Hindernisse vorgestellt, welches in einem zusätzlichen Planungsschritt durchgeführt werden kann.

Ein neuartiges parametrisierbares Fahrzeugmodell, welches auf einem geregelten Fahrzeugverhalten basiert, bildet den Kernpunkt der entwickelten Simulationsumgebung, die einen einfachen Test des vorgestellten Managementsystems gestattet. Somit lassen sich im Gegensatz zu bisherigen Ansätzen mit physikalischen Fahrzeugmodellen realitätsnahe Simulationen auf der Grundlage weniger Parameter durchführen.

Das entwickelte Gesamtkonzept wurde sowohl in simulativen Tests als auch in realen Seeversuchen validiert und bestätigt.

Abstract

The growing importance of research and industrialization of the oceans leads to new technical tasks in this challenging area. First of all, the extreme underwater conditions require the use of heterogeneous robotic systems which are capable to fulfill predefined missions in an autonomous manner. This work presents a novel and comprehensive concept to manage teams of heterogeneous unmanned marine vehicles which includes a novel concept of mission planning in order to allow the realization of complex mission scenarios.

The main part of this work is the novel two-stage management system which can be added to existing single autonomous systems to allow a cooperation between them. Based on a flexible and expandable portfolio of mission elements, it facilitates the coordination of multiple unmanned marine vehicles. Thereby, the complexity of the mission task must only be handled by the developed team management. Furthermore, it uses the single autonomous capabilities of each vehicle based on a constant command library. Hence, a modification of the vehicles' existing hard- and software is not necessary.

In addition, this work presents a newly developed concept of mission planning for multiple unmanned marine vehicles which allows the planning of complex team missions by an end user without a profound knowledge of the mission language. In this context a novel concept of formation oriented avoidance of known objects is presented which can be realized in an additional planning step.

A novel configurable vehicle model based on a controlled vehicle behavior makes up the main part of the developed simulation environment which allows an easy test of the management system presented. Compared to previous concepts with physical vehicle models, a realistic simulation is possible which needs just a few standard parameters of the vehicles.

The developed concept was validated in simulation as well as in real sea trials.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation der Arbeit und das Forschungsprojekt GREX	2
1.2	Zielstellung und Aufbau der Arbeit	4
2	Stand der Technik und Rahmenbedingungen der Arbeit	7
2.1	Stand der Technik	7
2.1.1	Teammanagement	7
2.1.2	Missionsplanung und -sprache	8
2.1.3	Hindernisvermeidung	9
2.2	Rahmenbedingungen der Arbeit	10
2.2.1	Kommunikation	10
2.2.2	Navigation	13
2.3	Zusammenfassung	15
3	Teamorientiertes Missionsdesign	17
3.1	Grundkonzept	17
3.2	Allgemeine Struktur	19
3.3	Missionselemente für Einzelfahrzeuge	24
3.3.1	Punktmanöver	26
3.3.2	Bogenmanöver	26
3.3.3	Passive Manöverelemente	28
3.4	Missionselemente für Fahrzeugverbände	30
3.4.1	Punktmanöver	32

3.4.2	Bogenmanöver	33
3.4.3	Mäanderförmiges Manöver	35
3.4.4	Manöver zur Zielverfolgung	42
3.4.5	Manöver zum Einnehmen einer definierten Formation	45
3.4.6	Hierarchisch gestufte Manöver	48
3.4.7	Passive Manöverelemente	52
3.5	Zusammenfassung	54
4	Missionsplanung für Fahrzeugverbände	55
4.1	Planungskonzept	55
4.1.1	Planungstechnische Einordnung der Teammissionselemente . . .	56
4.1.2	Formationstreue und Pfadplanung	57
4.1.3	Beachten der Fahrzeugspezifikationen	60
4.2	Softwaregestützte Missionsplanung	61
4.2.1	Aufbau der Planungssoftware	61
4.2.2	Ablauf der Missionsplanung	66
4.3	Formationstreue Hindernisvermeidung bekannter Objekte	70
4.3.1	Hindernisrepräsentation im Kontext formationsorientierter Kollisionsvermeidung	71
4.3.2	Graphenbasierte Pfadsuche zur formationstreuen Hindernisvermeidung	78
4.4	Zusammenfassung	83
5	Managementkonzept für Verbände autonomer Fahrzeuge	85
5.1	Aufbau des Teammanagements	86
5.1.1	Datenmanagement	88
5.1.2	Missionsüberwachung	89
5.1.3	Missionsumplanung	91
5.2	Koordination von Verbänden maritimer Fahrzeuge	92
5.2.1	Initialisierung eines Fahrzeugverbands	94
5.2.2	Koordination innerhalb von Basismanövern	99

5.2.3	Koordination innerhalb komplexer Manöver	104
5.2.4	Koordination innerhalb gestufter Manöver	112
5.2.5	Verhalten bei Notsituationen	114
5.3	Zusammenfassung	114
6	Umsetzung und Ergebnisse	115
6.1	System- und Softwarearchitektur	115
6.1.1	Implementierung des Teammanagement-Moduls	115
6.1.2	Implementierung der Kommunikationsstruktur	117
6.2	Simulationsumgebung	121
6.2.1	Parametrisierbares Fahrzeugmodell	121
6.2.2	Umweltsimulation	129
6.3	Simulativer Test des Gesamtsystems	131
6.4	Seetests	135
6.5	Zusammenfassung	138
7	Zusammenfassung und Ausblick	139
7.1	Zusammenfassung	139
7.2	Ausblick	141
A	Beispielmissionen	143
A.1	Missionsplan mit Basismanövern	144
A.1.1	Teammissionsplan	144
A.1.2	Einzelmissionsplan Delfim	147
A.2	Missionsplan mit einem mäanderförmigen Manöver	151
A.2.1	Teammissionsplan	151
A.2.2	Einzelmissionsplan Delfim	154
A.3	Missionsplan mit hierarchisch gestuftem Manöver	158
A.3.1	Teammissionsplan	158
A.3.2	Einzelmissionsplan Delfim	161
A.3.3	Einzelmissionsplan DelfimX	164

B Grafische Benutzeroberfläche der Missionsplanung	167
C Aufbau der Fahrzeugdatensätze	173
C.1 Aufbau der XML basierten Dateistruktur	173
C.2 Verwendete Datentypen und Einheiten	175
C.2.1 Datentypen	175
C.2.2 Maßeinheiten	176
C.2.3 Arten von Informationen	176
C.3 Notwendige Fahrzeuginformationen	177
C.4 Beispiel	181
Literaturverzeichnis	187

1 Einleitung

Mehr als 70 % der Erde sind von Ozeanen bedeckt. Diese Gebiete sind für die Forschung aber auch für die industrielle Nutzung besonders interessant, da sie den am wenigsten erschlossenen Teil unserer Welt darstellen. Vor allem die unter Wasser herrschenden extremen Bedingungen wie die auftretenden Druckverhältnisse, unterschiedlichen Wassertrübungen und -temperaturen oder der fehlende Zugang zu globalen Navigationsmethoden erschweren Aktivitäten in diesen Bereichen erheblich und gestalten diese sehr kostenintensiv. Aus diesem Grund gewinnen unbemannte Robotersysteme, die selbstständig einfache Missionen ausführen oder bei komplexen Aufgaben von Operatoren aus sicherer Entfernung gesteuert werden, seit Jahren erheblich an Bedeutung und sind bei der Erschließung der Ozeane nicht mehr wegzudenken. Typische Einsatzgebiete wie die Instandhaltung von Hochseeleitungen oder die Kartographierung des Tiefseebodens belegen dies. Die gegenwärtigen Szenarien zeigen jedoch die Einschränkungen, die für den Einsatz dieser Systeme gelten, hervorgerufen durch das Fehlen GPS-gestützter Navigation und kabelloser Breitbandkommunikationssysteme sowie das Auftreten unvorhersehbarer Störungen unter Wasser. Wird eine aktive Kommunikation benötigt, wie sie zum Übertragen von Steuer- oder Bilddaten erforderlich ist, so muss dies über eine direkte Kommunikationsleitung, zum Beispiel durch ein Glasfaserkabel, realisiert werden. Daher werden Missionen sowohl im autonomen, als auch im ferngesteuerten Betrieb, derzeit lediglich mit Einzelsystemen realisiert [YBJ⁺07].

Um auf der einen Seite sowohl die Flexibilität als auch die Einsatzgebiete im maritimen Bereich zu erweitern und auf der anderen Seite aber Kosten für den Einsatz autonomer Roboter zu senken, sind mehrere koordiniert agierende Systeme notwendig. Durch

die Tiefseekartographierung oder die Suche nach hydrothermalen Schloten [CSC⁺09] ergeben sich Missionsszenarien, die Teams autonomer maritimer Fahrzeuge erheblich begünstigen oder sogar zwingend erfordern. Vor allem über den Einsatz mehrerer in Kooperation stehender Systeme lassen sich komplexe Algorithmen wie eine Zielsuche durch Triangulation/ Trilateration oder gradientenbasierte Suchverfahren realisieren. Ein weiterer Vorteil einer derartigen Arbeitsteilung ist die Reduzierung der Einsatzzeit und damit verbunden die Reduzierung der Einsatzkosten, welche sich derzeit vor allem durch die Unterhaltskosten der benötigten Versorgungsschiffe ergeben.

1.1 Motivation der Arbeit und das Forschungsprojekt GREX

Die dargestellten Entwicklungstendenzen im maritimen Bereich sind Motivation für die vorliegende Arbeit, in der die Entwicklung eines Planungs- und Managementsystems für einen Verband aus unterschiedlichen autonomen maritimen Fahrzeugen im Vordergrund steht. Während die Einzelautonomie maritimer Systeme bereits die industrielle Einsatzreife erreicht hat, befinden sich die Forschungen für mehrere koordiniert arbeitende Systeme noch in den Anfangsphasen. Insbesondere im maritimen Bereich, der durch seine schwierigen Umgebungsbedingungen zu den anspruchsvollsten überhaupt zählt, finden sich derzeit keine bekannten Lösungsansätze. Das durch das sechste Rahmenprogramm der EU geförderte internationale Projekt GREX¹ (lateinisch für Schwarm oder Herde) beschäftigte sich, als erstes öffentliches Forschungsprojekt überhaupt, mit der Führung und Koordinierung von Teams heterogener autonomer maritimer Fahrzeuge und bildet die Grundlage für diese Arbeit. Das Konsortium aus den Industrie- und Forschungseinrichtungen ATLAS Elektronik GmbH (Bremen), Centre of IMAR der Universität der Azoren (Horta, Portugal), Ifremer (Toulon, Frankreich), Innova S.p.A. (Rom, Italien), Instituto Superior Técnico (Lissabon, Portugal), MC

¹FP6 Projekt IST-035223, www.grex-project.eu

Marketing Consulting (Kiel), Seebyte Ltd. (Edinburgh, Schottland) und der Technischen Universität Ilmenau realisierte in über drei Jahren Arbeit ein komplettes Middleware-System, bestehend aus den notwendigen Hard- und Softwarekomponenten, um einzelautonome Fahrzeuge teamfähig zu machen. Durch Kooperation kann somit ein definiertes Ziel auf effiziente Art und Weise erreicht werden. Einen wesentlichen Schwerpunkt bildet dabei neben der Kommunikation und der Koordination das Teammanagement, welches die Basis zur Realisierung komplexer Missionen und einen der Kernpunkte dieser Arbeit darstellt.

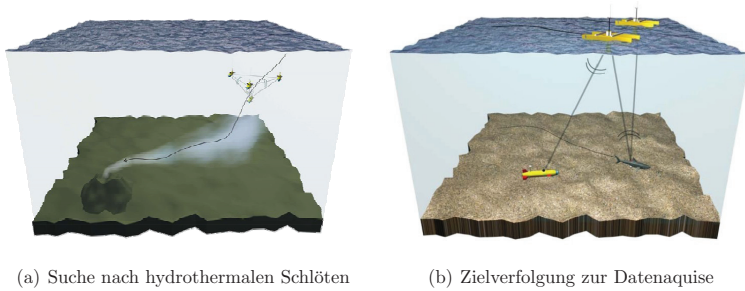


Abbildung 1.1: Missionsszenarien des GREX-Projekts, Quelle: Instituto Superior Técnico (Lissabon, Portugal)

Abbildung 1.1 zeigt zwei mögliche Szenarien, die mit Hilfe der GREX-Plattform und somit durch die Kooperation verschiedener autonomer Systeme realisiert werden können. Für die Suche nach hydrothermalen Schlöten, siehe Abbildung 1.1(a), kann ein Verband von Fahrzeugen genutzt werden, um gezielt dem Gasausstoss eines Zielobjekts zu folgen. Auf diese Weise stehen für die Berechnung eines Verfolgungskurses mehrere Stützstellen zur Verfügung, wodurch eine Suche sowohl erleichtert als auch verkürzt wird. Einem ähnlichen Ansatz wird bei der Verfolgung von bewegten und mit einem elektronischen Chip ausgestatteten Zielobjekten, siehe Abbildung 1.1(b), nachgegangen. Dieses, ebenfalls durch die Meeresforschung inspirierte Szenario, soll das Herunterladen von Daten markierter Fische erlauben. Sind die Uhren der Fahrzeuge

synchronisiert, ist über Triangulation/ Trilateration eine Positionsschätzung und somit eine Verfolgung des Zielobjektes möglich. Einzelfahrzeuge können derartige Missionen nicht oder nur unter erheblichem Aufwand lösen. Durch den Einsatz mehrerer koordiniert agierender autonomer maritimer Fahrzeuge ergeben sich jedoch zusätzliche Probleme, die in einer Systemlösung Beachtung finden müssen. Herausforderungen wie die fehlende GPS-Navigation, die fehlende Breitbandkommunikation sowie das Auftreten von unbekannten Störgrößen charakterisieren den Unterwasserbereich und zeigen die Schwierigkeit dieses Unterfangens. Weiterhin muss beachtet werden, dass die realisierte Systemlösung eine Kooperation von Fahrzeugen verschiedener Bauart ermöglicht. Die kostengünstige Erweiterung bestehender Systeme macht die Anschaffung eines spezialisierten Fahrzeugverbands überflüssig und fördert die Kooperation zwischen verschiedenen Fahrzeugbetreibern.

1.2 Zielstellung und Aufbau der Arbeit

Die Zielstellung dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Teammanagement- und Planungssystems für Verbände autonomer Fahrzeuge. Das dafür entwickelte neuartige Konzept ermöglicht eine Interaktion zwischen Fahrzeugen verschiedener Bauart und ist nicht auf einen bestimmten Hersteller oder Systemtyp festgelegt, da es auf dem jeweiligen bestehenden Systemdesign aufsetzt. Die ursprüngliche Fahrzeughardware bleibt somit unverändert und macht die Anschaffung neuer, auf einen Teameinsatz spezialisierter Fahrzeuge unnötig. Weitere Herausforderungen zeigen sich durch die Restriktionen bzw. Geheimhaltungsverpflichtungen der Fahrzeughersteller und -betreiber. Es ist im Allgemeinen nicht möglich, detaillierte Daten der Fahrzeuge zu bekommen oder eine direkte Kontrolle dieser zu erlangen. Das vorgestellte Management- und Planungssystem beachtet diese Einschränkungen und ermöglicht die Koordination auf Basis von grundlegenden Informationen und in Kooperation mit dem jeweiligen Fahrzeug. Ein neu entwickeltes parametrierbares kinematisches Fahrzeugmodell ermöglicht des Weiteren eine Simulation sowie einen ausgiebigen Test der entwickelten Algorithmen.

Die Komplexität der Verwaltung und Führung eines Verbands autonomer Systeme wird dabei vom einzelnen Fahrzeug fern gehalten. Auf dieser Basis lassen sich komplexe Missionsszenarien mit mehreren Systemen realisieren, allein durch die Nutzung der einzelautonomen Fähigkeiten der jeweiligen Systeme. Das entwickelte Konzept ist für den Einsatz auf autonomen maritimen Systemen ausgelegt, welche zusätzlich starken Einschränkungen in Kommunikation und Navigation unterliegen. Aus diesem Grund sind weitere Anwendungsfelder wie Luft- und Landsysteme ebenfalls denkbar. Abbildung 1.2 zeigt den Aufbau der vorliegenden Arbeit grafisch und verdeutlicht die Zusammenhänge der einzelnen Bereiche.

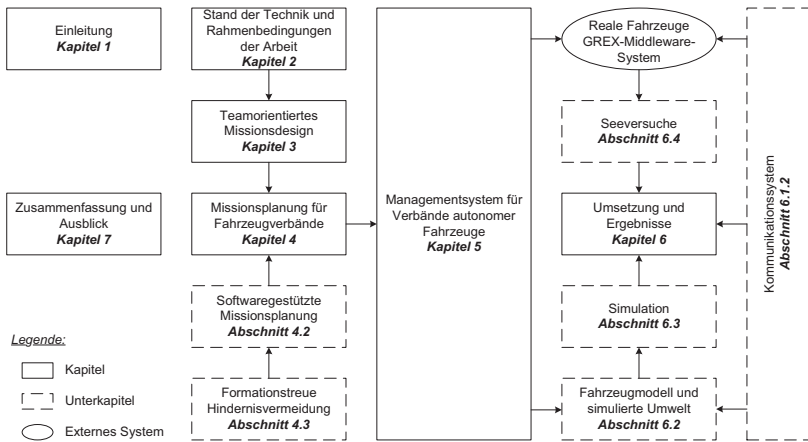


Abbildung 1.2: Aufbau der Arbeit

Im folgenden Kapitel 2 wird auf den Stand der Technik eingegangen. Neben einem Überblick aktueller Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet autonomer maritimer Fahrzeugverbände werden aktuelle Methoden und Technologien der Fahrzeugnavigation, der Kommunikation sowie der Missionsplanung im maritimen Bereich vorgestellt. Somit beschreibt Kapitel 2 zusätzlich die Rahmenbedingungen dieser Arbeit. Das in Kapitel 3 vorgestellte teamorientierte Missionsdesign beschreibt die ersten Schritte zur Realisierung von Verbänden maritimer Fahrzeuge. Es beinhaltet neben dem Aufstellen

eines passenden Planungskonzepts die Entwicklung einer teamorientierten Missionsprache. Diese Thematik wird in Kapitel 4 fortgeführt und die Realisierung einer softwaregestützten Planung von Teammissionen beschrieben. Des Weiteren wird in Kapitel 4 ein Konzept zur formationstreuen Hindernisvermeidung bekannter Objekte vorgestellt. Den Kernpunkt der vorliegenden Arbeit stellt die Entwicklung eines Managementsystems für Teams einzela autonomer Fahrzeuge dar, welches in Kapitel 5 ausführlich behandelt wird. Dies beinhaltet neben dem Aufbau des Managementsystems die Algorithmik für eine szenarienbasierte Koordinierung von Fahrzeugverbänden. In Kapitel 6 werden die erreichten Ergebnisse präsentiert und bewertet. Als Grundlage dienen simulativ durchgeführte Tests sowie zahlreiche Seeveruche. Neben der softwaretechnischen Umsetzung des Teammanagements sowie der notwendigen Kommunikationsstrukturen behandelt dieses Kapitel ebenfalls den Aufbau des genutzten Simulationssystems auf Basis eines parametrisierbaren kinetischen Fahrzeugmodells. Den Abschluss findet die Arbeit im Kapitel 7, welches einen zusammenfassenden Überblick gestattet. Weiterhin gewährt es einen Ausblick auf zukünftige Aktivitäten im Bereich der maritimen autonomen Systeme.

Die vorliegende Arbeit bietet die folgenden neuartigen Ansätze:

- Koordination von Verbänden heterogener autonomer maritimer Systeme durch ein herstellerunabhängiges Managementsystem
- generisches Missionsdesign und softwaregestützte Missionsplanung für Verbände autonomer Fahrzeuge
- formationsorientierte Hindernisvermeidung bekannter Objekte
- Simulationsumgebung, basierend auf einem parametrisierbaren Fahrzeugmodell, zum Test des entwickelten Managementsystems.

2 Stand der Technik und Rahmenbedingungen der Arbeit

Die Forschungen auf dem Gebiet von Teams autonomer maritimer Fahrzeuge erhalten erst seit den letzten Jahren ein stark wachsendes Interesse. Im Gegensatz zum Einsatz von Fahrzeugverbänden zu Land oder in der Luft stehen vor allem die Kommunikation und die Navigation im Mittelpunkt des Interesses und müssen bei der Realisierung eines Managementsystems beachtet werden. Dieses Kapitel gibt einen kurzen Einblick in die aktuellen Forschungsaktivitäten und Herausforderungen in diesem Bereich und zeigt damit die Rahmenbedingungen für diese Arbeit.

2.1 Stand der Technik

2.1.1 Teammanagement

Diese Arbeit beschreibt einen neuartigen Ansatz, der das Management eines Verbands aus heterogenen autonomen maritimen Über- und Unterwasserfahrzeugen realisiert. Das Teammanagement beschreibt dabei die Organisation und Führung eines Verbands autonomer Fahrzeuge. Konzepte zur Realisierung von Teams autonomer maritimer Fahrzeuge basieren derzeit vor allem auf der Nutzung eines Fahrzeugtyps. Dies zei-

gen beispielhaft die Entwicklungen des AUSI¹, welche in [CKB⁺07] dargestellt sind. Schwerpunkt des vorgestellten Systems ist die Seebodenkartographierung in Küstennähe auf Basis mehrerer solarbetriebener Unterwasserfahrzeuge. Das Teammanagement sowie die Kooperation zwischen den Fahrzeugen beschränkt sich derzeit auf ein niedriges und den Bedürfnissen des genannten Szenarios angepasstes Level. Somit findet eine sequentielle Abarbeitung der Missionselemente durch jeweils ein Fahrzeug statt, während die weiteren Mitglieder des Verbands über die eingebauten Solarzellen ihre Batterien aufladen. Ist ein Teil der Mission beendet, führt das Fahrzeug mit dem höchsten Ladezustand den kommenden Abschnitt durch.

Weitere Beispiele für die Kooperation zwischen autonomen Systemen finden sich vor allem im Land- und Luftbereich. GPS-gestützte Navigation, das Vorhandensein von Breitbandkommunikation und die Nutzung leistungsfähiger Rechner ermöglichen eine aktive störungsarme Kommunikation und Koordination. In [SR09] ist dies anhand von Flugsystemen sowie verschiedenen Missionsszenarien gezeigt. Die aufgezeigten Ansätze dienen vor allem der Umsetzung militärischer Aufgaben und sind für die Nutzung einer Breitbandkommunikation ausgelegt.

2.1.2 Missionsplanung und -sprache

Bislang gibt es keine standardisierten Planungstools für Verbände unterschiedlicher einzelautonomer maritimer Fahrzeuge, da industrielle oder militärische Einsätze vorwiegend mit unbemannten Einzelfahrzeugen durchgeführt werden. Diese besitzen ein durch den Hersteller oder Betreiber angepasstes Planungs- und Beobachtungssystem, wodurch eine Generalisierung zusätzlich erschwert wird. Weiterhin ist es oft nicht möglich, an detaillierte Fahrzeugeigenschaften zu gelangen, was die Planungssprache einschließt. Die Missionsplanung beschreibt dabei den zielgerichteten Prozess zum Aufbau eines Ablaufplans für ein Fahrzeug oder einen Fahrzeugverband. Ein interessanter Ansatz der Missionsplanung findet sich beim *Modular Mission Planning Toolkit* des AUSI.

¹Autonomous Undersea Systems Institute, New Hampshire, USA, <http://ausi.org/>

Das vorgestellte militärisch eingesetzte System nutzt dabei die gesammelten Daten von kooperiert agierenden solargestützten Unterwasserfahrzeugen, um interne Modelle zur Umgebungsrepräsentation und Strömungsmodelle zu aktualisieren und die Flotte mit aktuellen Daten zu versorgen. Somit ist jederzeit eine auf aktuellen Daten basierte Missionsplanung möglich. Der Einsatz dieser Systeme ist jedoch auf flache und sehr flache Gewässer beschränkt.

Das einzige derzeit auf dem Markt erhältliche und kommerziell vertriebene Planungstool für maritime Fahrzeuge ist SeeTrack² der schottischen Firma SeeByte. Es bietet neben einer textbasierten Planungssprache die Möglichkeit, Missionen zu beobachten und diese nachträglich zu bearbeiten. Weiterhin beinhaltet es verschiedene Standards, um Daten der Fahrzeugsensorik aufnehmen und auswerten zu können. Durch den industriellen und militärischen Einsatz dieses Programms bietet es eine ideale Grundlage für die Entwicklung einer Teamsprache, ist für die Planung von Missionen für Fahrzeugverbände aber nicht geeignet.

2.1.3 Hindernisvermeidung

Wie [ACFS01] und [KK09] beispielhaft zeigen, finden sich auf dem Gebiet der Hindernisvermeidung im maritimen Bereich vor allem Ansätze für Einzelsysteme. Diese setzen eine spezielle Sensorik der Fahrzeuge voraus, um Hindernisse zu detektieren oder sind auf einen bestimmten Fahrzeugtyp festgelegt [ACFS01].

Ein konzeptionelles Hindernisvermeidungssystem für einen Fahrzeugverband wird in [JL07] vorgestellt. Die Betrachtung der Hindernisse erfolgt dabei über eine Potentialfunktion, welche die Kraft beschreibt, die ein Hindernis abhängig von der Entfernung zu einem Fahrzeug auf dieses ausübt. Fahrzeuge, welche einem Hindernis zu nahe kommen, werden dadurch abgedrängt und das Hindernis über definierte Verhaltensregeln umfahren. Die vorgestellten Simulationsergebnisse zeigen, dass sich das System vor allem für kleinere Hindernisse, die lediglich den Pfad eines Fahrzeugs schneiden, eig-

²www.seebyte.com/page/see-track-military

net. Komplexe Hinderniskonstellationen erfordern daher zusätzliche Maßnahmen sowie einen erhöhten Kommunikations- und Synchronisationsaufwand zwischen den einzelnen Fahrzeugen, um Kollisionen zu vermeiden. Für den Einsatz auf realen Systemen ist das vorgestellte Konzept somit nicht geeignet.

Im Bereich autonomer Flugsysteme stellt [SA10] einen möglichen Lösungsansatz für eine kooperative 3-D Pfadplanung mit Hindernisvermeidung vor. Das auf Hodographen [Apo03] basierende Planungssystem ist in der Lage statische und bekannte Hindernisse, welche als Sphären repräsentiert werden, zu vermeiden. Wie in [JL07] werden die Pfade der Fahrzeuge dabei jedoch einzeln betrachtet, wodurch keine aktive Formationserhaltung möglich ist.

Für eine formationsorientierte Hindernisvermeidung von Objekten im Kontext eines realen kooperiert agierenden Fahrzeugverbands heterogener maritimer Systeme gibt es derzeit keine Ansätze. Die Hauptursache dafür liegt in der starken Abhängigkeit von einer stabilen Unterwasserkommunikation, welche für relevante Umplanungen und Koordinationsbefehle notwendig, derzeit aber nicht realisierbar ist. Das in dieser Arbeit vorgestellte Konzept zur Hindernisvermeidung beschränkt sich daher auf das Ausweichen von bekannten Objekten und gestattet eine verbesserte Missions- und Pfadplanung, durch eine Erweiterung des in [Eic04] vorgestellten graphenbasierten Verfahrens.

2.2 Rahmenbedingungen der Arbeit

2.2.1 Kommunikation

Das stark wachsende Interesse an autonomen maritimen Fahrzeugen geht einher mit der Entwicklung neuer Kommunikationsmöglichkeiten. Während für die Kommunikation über Wasser auf Standardverfahren wie Radio- oder kabellose Breitbandnetzwerk-kommunikation zurückgegriffen werden kann, befindet sich die Forschung für ausge-reifte Verfahren zur Unterwasserkommunikation noch in den Anfängen. Vor allem das

zunehmende Interesse an Verbänden autonomer maritimer Fahrzeuge erfordert eine stabile und sichere Unterwasserkommunikation, um dem erhöhten Datenaufkommen zur Koordinierung und Steuerung eines Verbandes gerecht zu werden. In [CSFS08] und [CSS08] ist ein Überblick über die aktuellen Entwicklungen im Bereich der akustischen Unterwasserkommunikation gegeben. Um Daten auf diesem Weg zu übertragen, werden sie inkohärent oder kohärent codiert und über einen akustischen Kanal gesendet. Bei inkohärenten Verfahren, wie der Frequenzmodulation, ist zur Demodulation eines Signals die Frequenz und Phasenlage der zugehörigen Trägerfrequenz nicht notwendig. Aus diesem Grund sind sie robuster und weniger stör anfällig als kohärente Verfahren, wie die Phasenmodulation, welche bei der Demodulation die Trägerfrequenz eines Signals ermitteln müssen. Wie [LHZ⁺08] zeigt, finden sich daher zumeist inkohärente Modulationsverfahren in kommerziell verfügbaren Modems. Kohärente Ansätze weisen derzeit vor allem in flachem Wasser Probleme bei der Demodulation auf, zurückzuführen auf die große Empfindlichkeit des Signals und dessen Abschwächung durch umweltbedingte Unregelmäßigkeiten. Da sich im Vergleich zur inkohärenten Modulation jedoch bis zu 100-mal größere Übertragungsgeschwindigkeiten realisieren lassen, stehen kohärente Ansätze aktuell im Mittelpunkt des Forschungsinteresses. Generell ist eine aktive Kommunikation unter Wasser abhängig von den Umgebungsbedingungen wie Tiefe, Salzgehalt oder dem Vorhandensein von Schwebstoffen. Eine stabile und dauerhafte Verbindung kann dadurch selbst mit Modems neuester Generation nicht gewährleistet werden. Ein Kommunikationsnetzwerk für einen unter Wasser agierenden Fahrzeugverband ist derzeit aufgrund der genannten Probleme und der sehr eingeschränkten Modemfähigkeiten nur in extrem begrenztem Maße möglich und ist, wie [APM05] und [CSS08] zeigen, aktuell ein Forschungsschwerpunkt auf dem Gebiet der akustischen Unterwasserkommunikation. Weiterhin belegt [Pre06] die Herausforderungen auf diesem Gebiet.

Einen weiteren Ansatz bieten optische Kommunikationssysteme auf Basis von Lasern. Diese erfordern jedoch eine möglichst klare Sicht unter Wasser und besitzen, wie [PFW⁺08] zeigt, bei nahezu idealen Bedingungen eine Reichweite von einigen hundert Metern. Damit ist die Reichweite wesentlich geringer als bei akustischen Systemen mit

teilweise über 10 km. Für einen Fahrzeugverband mit einem mittleren Abstand der Fahrzeuge zueinander würden diese Systeme jedoch eine wichtige Alternative darstellen und hohe Datenraten ermöglichen.

Neben den genannten Kommunikationsverfahren bieten Unterwasserradiomodems eine weitere Möglichkeit eine Kommunikation über sehr kurze Distanzen zu realisieren. Eingehende Studien mit Modems dieser Generation wurden jedoch noch nicht veröffentlicht.

Zusammenfassend zeigt Abbildung 2.1 eine Übersicht derzeit genutzter Verfahren der Unterwasserkommunikation.

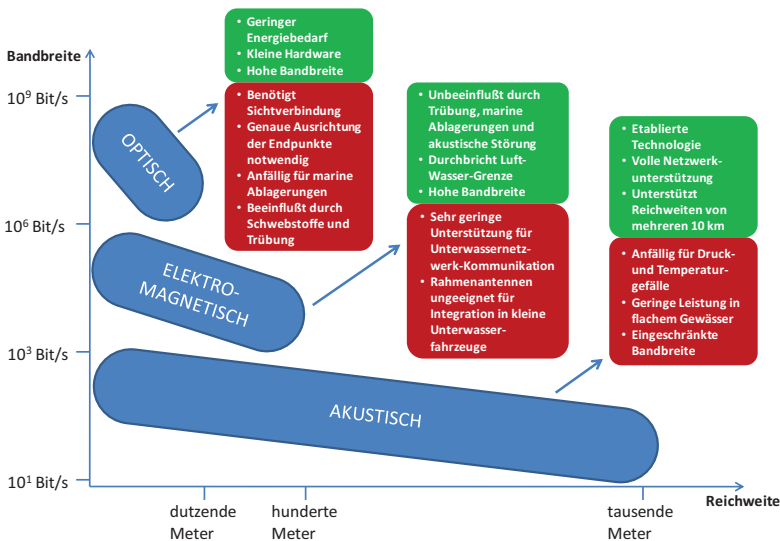


Abbildung 2.1: Qualitativer Überblick aktuell genutzter Kommunikationskanäle im Unterwasserbereich, Quelle: NURC, a NATO Research Centre (La Spezia, Italien)

2.2.2 Navigation

Die Navigation definiert sich im maritimen Bereich über die Bestimmung der Position eines Fahrzeugs bzw. der Positionen der Fahrzeuge eines Verbands und stellt ein ähnlich komplexes Forschungsgebiet wie die Unterwasserkommunikation dar. Trotz fehlender globaler Positionssysteme wie GPS ist es, wie [BSO09] und [MSO09] zeigen, heutzutage möglich, einzelne Fahrzeuge sehr genau zu navigieren. Dies wird im Wesentlichen durch Inertialnavigations- und Dopplerlog-Systeme ermöglicht. Die Inertialnavigation nutzt dabei die Beschleunigungswerte des Fahrzeugs, um eine fortlaufende Positionsschätzung zu generieren. Hochgenaue Systeme in einer Preislage von über einhunderttausend Euro nutzen zumeist Laserkreisel, welche hochempfindlich und verschleißfrei arbeiten. Standardsysteme messen die entsprechenden Werte zumeist mit Faserkreisel, was die Kosten auf unter ein Viertel der Laserkreiselssysteme reduziert. Um dennoch eine hochgenaue Positionsschätzung zu ermöglichen, werden diese Systeme oftmals mit weiterer Sensorik kombiniert. Eine Möglichkeit bietet die Kombination mit einem Dopplerlog. Derartige Geräte, in einer Preislage von etwa zwanzigtausend Euro, senden Schallwellen aus, welche vom Meeresboden oder von Schwebeteilchen reflektiert werden. Durch die Bewegung des Fahrzeugs tritt beim Empfangen der reflektierten Schallwellen ein Dopplereffekt auf, der vom Navigationssystem ausgewertet wird. Auf Basis der beschriebenen Standardsensorik wären die Kosten für einen Fahrzeugverband immens hoch und kaum realisierbar. Ein alternatives System wird in [BLF09] vorgestellt und nutzt innerhalb eines Fahrzeugteams lediglich ein Fahrzeug mit hochgenauer Sensorik. Die anderen Fahrzeuge des Verbands besitzen kostengünstigere und weniger genaue Navigationslösungen. Über eine akustische Kommunikation in Kombination mit einer relativen Positionsbestimmung zum Fahrzeug mit hochgenauer Sensorik können diese ihre eigene Navigation verbessern. Um eine kontinuierliche Positionsaussage zu erlauben und Lücken in der Kommunikation auszugleichen, ist eine Positionsschätzung notwendig, welche standardmäßig auf Kalman-Filtern basiert. Verschiedene Umsetzungen finden sich beispielsweise in [BXcCh08] und [QX07]. Sind die Startpositionen der Fahrzeuge unbekannt, können Partikelfilter wie in [LSH08] und

[MPM⁺09] Abhilfe schaffen. Diese benötigen gegenüber den Kalman-Realisierungen jedoch wesentlich mehr Rechenleistung. Ein weiterer Nachteil der akustischen Kommunikation sind die auftretenden Verzögerungen beim Nachrichtenaustausch. Diese sollten bei einer Positionsschätzung Beachtung finden. Lösungsvorschläge hierfür zeigen [SGJ⁺08] und [YXY09].

Fest installierte oder an Bojen montierte Akustikbaken bieten innerhalb eines begrenzten Gebiets eine weitere Möglichkeit, die Position eines Unterwasserfahrzeugs zu bestimmen. Da die Positionen der Baken bekannt sind, kann in einem begrenzten Gebiet über ein vom Fahrzeug ausgesendetes akustisches Signal dessen Position berechnet werden. Das Verfahren beruht auf der Berechnung der Zeitdifferenz beim Empfang des Signals an den einzelnen Messpunkten. Aus diesem Grund muss die Konfiguration der Empfänger sehr exakt sein und stellt dadurch einen zeit- und kostenintensiven Prozess dar. Neuere Ansätze, wie in [SA09] beschrieben, versuchen sich daher auf lediglich einen Transponder zu beschränken. Eine weitere Möglichkeit auf der Basis mehrerer intelligenter Bojen [Tho98], welche neben einer Positionsschätzung die Verbesserung der Navigation eines Fahrzeugs gestatten, findet sich in [ACM10] und [SAO⁺08]. Jede Boje besitzt ein genaues GPS-System und ist in der Lage, ein vom Fahrzeug periodisch gesendetes Signal zu empfangen. Somit kann an einer Basisstation mit Hilfe der Triangulation/ Trilateration, über die genaue Position der Bojen und die Empfangszeiten eines Signals, die Position des Fahrzeugs bestimmt werden. Die ermittelte Position wird dem Fahrzeug anschließend über eine akustische Kommunikationsstrecke mitgeteilt und dient der Verbesserung der Navigation. Dadurch, dass das Fahrzeug die Position der Bojen nicht kennen muss, sind diese nicht an eine feste Position gebunden und können sich frei bewegen. Damit ist das System portierbar und vergleichsweise schnell einsatzbereit.

Eine weitere Möglichkeit der Navigation von Unterwasserfahrzeugen bietet, wie in [CWRP10] und [TP08] gezeigt, die terrainbasierte Navigation. Zur Orientierung werden vom Fahrzeug in mehrere Richtungen Entfernungsmessungen zum Meeresboden durchgeführt und mit einer bekannten Seekarte abgeglichen. Diese Art der Navigation ist somit auf Vorwissen angewiesen und auf bekannte Seegebiete begrenzt.

Generell ist festzustellen, dass es für die Navigation von mehreren Unterwasserfahrzeugen momentan keine Standardverfahren gibt. Dies liegt vor allem an der Abhängigkeit von einer stabilen Unterwasserkommunikation, die für die Realisierung von kooperierenden Fahrzeugverbänden benötigt wird.

Tabelle 2.1 zeigt eine Übersicht aktueller Navigationsarten. Die Einschätzung der Genauigkeit ist hierbei allgemein gehalten, da diese stark von der verwendeten Hardware abhängt.

Tabelle 2.1: Arten der Unterwassernavigation

Navigationssystem	Genauigkeit	Bemerkung
Inertialnavigation	wenige zehn bis einige hundert Meter Drift pro Stunde	Systeme mit großer Genauigkeit teuer
Dopplerlog	bis einige hundert Meter Drift pro Stunde	nur bei wenigen hundert Meter über Meeresboden möglich
Multibojensystem	mehrere Meter	auf Gebiet um Bojen begrenzt
Einzelbojensystem	mehrere Meter	auf Gebiet um Boje begrenzt
Terrainbasiert	wenige Meter	Bodenprofil/ Seekarte muss bekannt/ vorhanden sein

2.3 Zusammenfassung

Zusammenfassend bestätigt der aktuelle Stand der Technik die Notwendigkeit, neuartige Konzepte zu entwickeln, die eine Kooperation heterogener autonomer maritimer Systeme ermöglichen. Derzeitige Ansätze beschränken sich bisher auf einen bestimmten Fahrzeugtyp oder -hersteller, wodurch die verwendete Missionssprache und -planung zumeist auf spezielle Szenarien und die Fähigkeiten der verwendeten Fahrzeuge ausgelegt ist. In diesem Zusammenhang wurde die Thematik der Hindernisvermeidung bislang lediglich für Einzelsysteme untersucht.

Herausforderungen im maritimen Bereich stellen gegenwärtig vor allem die unausgereifte Unterwasserkommunikation und Teamnavigation dar, welche bei der Realisierung eines Teammanagementkonzepts beachtet werden müssen. Während die Navigation einzelner Fahrzeuge sehr genau möglich ist, ergeben sich für die Navigation mehrerer koordiniert agierender Fahrzeuge große Schwierigkeiten, hervorgerufen durch die Abhängigkeit von einer funktionierenden und sicheren Unterwasserkommunikation.

3 Teamorientiertes Missionsdesign

Für die Realisierung kooperierender Verbände verschiedener einzela autonomer Systeme, die gemeinsam an der Lösung einer Aufgabe arbeiten, ist es notwendig, sich vorerst mit den einzela autonomen Fähigkeiten bestehender maritimer Robotersysteme, der Missionssprache sowie der Missionsplanung auseinanderzusetzen. Diese Schritte beschreiben den Prozess des teamorientierten Missionsdesigns und bilden die Grundlage für eine aktive Kooperation verschiedener Fahrzeuge. Dieses Kapitel behandelt die Schritte vom Aufstellen eines Basiskonzepts der Missionsplanung bis zur Entwicklung einer teamfähigen Missionssprache. Ergänzend zu diesem Kapitel werden im Anhang A Beispiele von Teammissionen präsentiert.

3.1 Grundkonzept

Eine Anforderungsanalyse mit Fahrzeugherstellern und -betreibern autonomer maritimer Systeme wie ATLAS Elektronik (Bremen), Ifremer (Toulon, Frankreich) und dem Instituto Superior Técnico (Lissabon, Portugal) stellt den ersten Schritt zum Aufbau eines Grundkonzepts dar. Sie zeigen, dass die Sicherheit der Fahrzeuge während eines Einsatzes oberste Priorität besitzt. Vor allem bei autonomen Unterwasserfahrzeugen ist man bestrebt, jedes nicht kalkulierbare Risiko auszuschließen, um den Verlust eines Fahrzeugs, und somit mehrerer hunderttausend Euro, zu vermeiden. Die sehr begrenzte Kommunikationsfähigkeit und Sichtweite unter Wasser machen ein späteres Auffinden verloren gegangener Fahrzeuge nahezu unmöglich. Ein Löschen oder Hinzufügen von

Missionselementen während der Laufzeit, wie in [Pfü03] vorgestellt, wurde daraufhin ausgeschlossen, da eine geplante Mission vor der eigentlichen Ausführung durch die Fahrzeuge geprüft und validiert werden muss. Um dennoch ein flexibles Missionsdesign zu realisieren, ist eine neue Parametrisierung von bestehenden Manövern sowie das Springen zu einem definierten Manöver erlaubt. Somit ist durch die Senkung der Komplexität nicht nur die Kompatibilität zu bestehenden Fahrzeugsystemen gesteigert, sondern auf der anderen Seite die Realisierung von koordinierten Missionen vereinfacht. Auf diese Art werden unter anderem die sehr eingeschränkten Kommunikationsmöglichkeiten, die sich derzeit im maritimen Bereich finden, nicht unnötig belastet, da ein statisches Grundgerüst der Missionen keine komplexen Synchronisierungsnachrichten erfordert. Als Basis für die Entwicklung einer flexiblen Missionssprache dient das textbasierte Missionsformat des Programms SeeTrack der schottischen Firma See-Byte. Es bietet für Einzelsysteme bereits eine marktreife Lösung, ist jedoch nicht für den Teameinsatz geeignet.

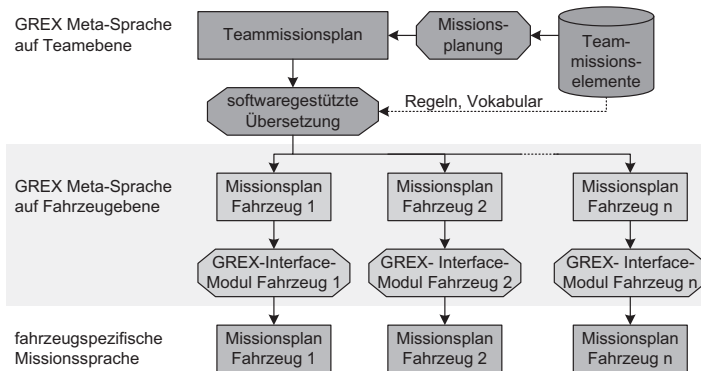


Abbildung 3.1: Grundkonzept der teamorientierten Missionsplanung

Wie in [GMOS07] vorgestellt, wird ein dreistufiges Planungskonzept realisiert. Abbildung 3.1 veranschaulicht dieses Konzept grafisch. Ausgangspunkt ist eine Bibliothek von Teammissionselementen, die über eine geeignete Missionsplanung zu einem Teammissionsplan kombiniert werden. Ein Regelwerk, abhängig von den vorhandenen Team-

missionselementen, ermöglicht daraufhin das Erstellen von Missionsplänen für Einzelfahrzeuge. Diese sind weiterhin in einer GREX-Metasprache beschrieben, welche auf dieser Ebene allerdings nur eine sehr geringe und konstante Komplexität aufweist. Eine Änderung des flexiblen Teammissionselemente-Datenpools, zum Beispiel durch das Hinzufügen von neuen Manövern, hat somit keine Auswirkungen auf die Metasprache der zweiten Ebene. Eine derartige Untergliederung ist notwendig, um unterschiedlichen Fahrzeugen das Laden, Übersetzen und Prüfen einer Mission zu ermöglichen, ohne die komplexe Teamlevelsprache zu kennen. Dies kennzeichnet die dritte Stufe des vorgestellten Konzepts. Zuständig dafür sind die in Abbildung 3.1 gezeigten fahrzeugspezifischen GREX-Interface-Module. Fahrzeuge, die an einer GREX-Mission teilnehmen, sind somit in der Lage, für alle internen Prozesse das fahrzeugspezifische Missionsformat zu nutzen. Dies unterstreicht zusätzlich das generische Konzept, welches im Vordergrund der Arbeit steht.

3.2 Allgemeine Struktur

Neben den Missionselementen für Einzelfahrzeuge und Fahrzeugverbände ist es notwendig, allgemeine Rahmenbedingungen zu definieren, die vor allem der Sicherheit der Fahrzeuge dienen. Den Anfang bildet die Benennung der Missionsdateien. Ein Teammissionsplan enthält somit lediglich den Einsatznamen der Mission, verbunden mit der Endung **.gtmp* (**GREX Team Mission Plan**) und besitzt dadurch folgenden Aufbau:

`Missionsname.gtmp`

Der Dateiname eines Einzelfahrzeugmissionsplans beinhaltet zusätzlich Informationen über den Fahrzeugbetreiber, die Bezeichnung des Fahrzeugs, den Fahrzeugnamen während der Mission und besitzt neben der Endung **.stmp* (**SeeTrack Mission Plan**, aus Kompatibilitätsgründen bezüglich der Planungssoftware SeeTrack) folgende Syntax:

Missionsname_Betreiber_Bezeichnung_Fahrzeugmissionsname.stmp

Durch diese Maßnahmen ist eine einfache wie robuste Zuordnung und Organisation der Missionsdaten möglich. Des Weiteren wurde ein allgemeines Missionsdesign festgelegt, nach dem sich sowohl die Pläne für Einzelfahrzeuge als auch die Pläne für Fahrzeugverbände richten müssen. Es besitzt die folgende Form:

```
Versionsnummer, Koordinatensystem, Referenzkoordinate
#<Operation>, Hauptelementnummer
Nebenelementnummer
#<Operation>, Hauptelementnummer+1
Nebenelementnummer+1
...
Nebenelementnummer+m
#<Operation>, Hauptelementnummer+n
Nebenelementnummer+m+1
#END, Hauptelementnummer+n+1
```

Jeder Plan besitzt eine Versionsnummer, um eine fortlaufende Entwicklung der Missionssprache zu erlauben und Kompatibilitätsprobleme zu vermeiden. Operationen, die mit einem #-Symbol gekennzeichnet werden, besitzen jeweils eine Hauptelementnummer und beinhalten Informationen zu den eigentlichen Manövern oder Spezifikationen. Um in einer Operation zusätzliche Informationen zu hinterlegen, kann sie beliebig viele Nebenelemente besitzen, die mit einer Nebenelementnummer eingeleitet werden. Sowohl die Haupt- als auch die Nebenelementnummern sind fortlaufend nummeriert. Für Koordinaten wurde das weltweit eingesetzte WGS84-Format [WGS00] festgelegt, während Zeitangaben in Sekunden und Tiefen- sowie Längenangaben in Meter anzugeben sind. Um zusätzlich eine auf kartesischen Koordinaten basierte Missionsplanung zu ermöglichen, wird das während der Planung genutzte Koordinatensystem durch *CART* (kartesisch) oder *GEO* (geodätisch) spezifiziert. Über die Angabe der entsprechenden

geodätischen Referenzkoordinate kann somit eine Umrechnung zwischen den genannten Koordinatensystemen erfolgen.

Neben den Rahmenbedingungen der Missionssprache gilt es im Weiteren die Bedingungen für die eigentliche Mission festzulegen. Dazu werden im Kopfteil jedes Missionsplans Angaben zur Versionsnummer sowie den Fahrzeug- und Missionsspezifikationen gemacht. Fahrzeug- und Teammissionspläne unterscheiden sich dahingehend lediglich bei der Fahrzeugspezifikation, da im Missionsplan für einen Fahrzeugverband alle Fahrzeuge gelistet sein müssen. Die Spezifikation für jedes an einer Mission beteiligte Fahrzeug, die sich im ersten Teil des Missionskopfs befindet, besitzt folgenden Aufbau:

```
#VEHICLE, Hauptelementnummer, FahrzeugID, Fahrzeugmissionsname,
    Bezeichnung, Parameterdatei, Nebenbedingung
```

Die einzelnen Elemente einer Spezifikationszeile sind in Tabelle 3.1 beschrieben. Um eine eindeutige Zuordnung der Fahrzeuge während einer Mission zu garantieren, ist jede Fahrzeugkennnummer einmalig. Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal ist die missionspezifische Bezeichnung des Fahrzeugs. Vor allem für baugleiche Fahrzeuge wird auf diese Weise sowohl die Lesbarkeit der Missionspläne als auch die Sicherheit erhöht.

Tabelle 3.1: *Elemente der Fahrzeugspezifikation*

Element	Beschreibung
FahrzeugID	Eindeutige Fahrzeugkennnummer für GREX-Missionen
Fahrzeugmissionsname	Bezeichnung des Fahrzeugs innerhalb einer Mission
Bezeichnung	Herstellerbezeichnung des Fahrzeugs
Parameterdatei	Dateiname der Parameterdatei des Fahrzeugs
Nebenbedingung	Optionale Angabe ob ein Fahrzeug durch ein Kabel mit einem anderen an der Mission beteiligten Fahrzeug verbunden ist (z. B. für Videoübertragung)

Der zweite Teil des Missionskopfs enthält grundlegende Angaben zum Missionsgebiet sowie wichtigen Missionspunkten. Erforderliche Missionsparameter werden dabei wie folgt angegeben:

#MISSIONCONSTRAINTS, Hauptelementnummer, Einsatzgebietsspezifikation

Ein Missionsgebiet kann dabei, wie in Tabelle 3.2 beschrieben, durch eine rotierte rechteckige Fläche oder durch ein Polygon dargestellt werden. Somit ist sowohl in freiem als auch in eingeschränkt befahrbarem Gelände eine flexible und sichere Missionsgestaltung möglich. Um die Sicherheit der Fahrzeuge zu gewährleisten, wird eine Mission automatisch abgebrochen, sobald das Missionsgebiet, die maximale Tiefe oder die maximale Missionszeit überschritten wird.

Tabelle 3.2: *Elemente der Einsatzgebietsspezifikation*

Element	Beschreibung
Flächentyp	Beschreibt die Form des Missionsgebiets 0 – Fläche wird durch rotiertes Rechteck beschrieben 1 – Fläche wird durch Polygon beschrieben
Flächenparameter	Angabe der notwendigen Flächenparameter in Abhängigkeit von dem gewählten Flächentyp für Flächentyp = 0: {Zentrumspunkt Latitude, Zentrumspunkt Longitude, Höhe, Breite, Rotationswinkel} für Flächentyp = 1: {Latitude 1, Longitude 1, Latitude 2, Longitude 2, ... Latitude n, Longitude n }
maximale Tiefe	Maximal zulässige Tiefe während der Missionsausführung
maximale Missionszeit	Maximale Laufzeit einer Mission in Sekunden

Da es während der Planung Elemente gibt, denen vor Beginn einer Mission keine eindeutige Koordinate zugeordnet werden kann, wurde eine Platzhalterposition definiert.

Sie beschreibt eine gültige Position innerhalb des festgelegten Missionsgebiets und befindet sich mit folgender Syntax am Ende des Missionsplankopfs:

#PLACEHOLDER, Hauptelementnummer, Latitude, Longitude

Nur durch die Verwendung dieser Position ist es möglich, eine fahrzeugseitige Validierung eines Missionsplans zu gewährleisten. Missionselemente, deren Position oder Verlauf vorab nicht geplant werden kann, wären ohne diese Maßnahme nicht prüfbar. Diese Position wird während der Ausführung mit missionsbezogenen Daten ersetzt. Kommt es im Verlauf einer Mission zu einem Fehler in der Umplanung, würden die Fahrzeuge automatisch diese Position anfahren. Somit dient diese Definition zusätzlich der Sicherheit, da unkontrollierte Fahrten nahezu ausgeschlossen sind.

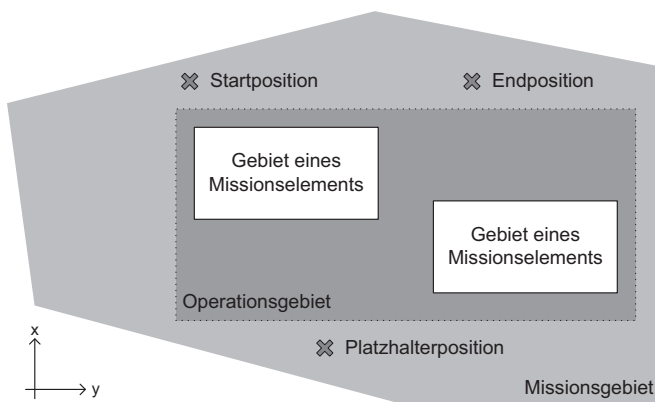


Abbildung 3.2: Überblick über die verschiedenen Gebietstypen während einer GREX-Mission

Wie in Abbildung 3.2 gezeigt, muss die Platzhalterposition außerhalb des Operationsgebiets liegen, da diese gleichzeitig zur Prüfung bestehender Missionselemente herangezogen wird. Da es bei der Navigation durch fehlende GPS-Updates oder eine längere Unterwasserfahrt zwangsläufig zu Ungenauigkeiten in der Schätzung der Fahrzeugpo-

sition kommt, ist eine Platzhalterposition im aktiven Operationsgebiet nicht empfehlenswert. Fehlinterpretationen und ein ungeplanter Missionsverlauf können die Folge sein. Das Operationsgebiet wird hierbei nicht separat definiert, sondern beschreibt über die Lage der einzelnen Missionselemente lediglich die Fläche der größten Aktivität.

3.3 Missionselemente für Einzelfahrzeuge

Nach der Definition der allgemeinen Missionsspezifikationen ist es notwendig, Missionselemente für Einzelfahrzeuge zu entwerfen, welche die zweite Ebene des dreistufigen Missionskonzepts bilden. Sie beinhalten einfachste Manöver in einer definierten Metasprache und beschreiben gleichzeitig die Mindestanforderungen an ein autonomes System, um an einer GREX-Mission teilnehmen zu können. Nach der Untersuchung der Fähigkeiten bestehender Systeme wurden folgende Punkte definiert, die ein Fahrzeug dahingehend unterstützen muss:

- das Warten an einer definierten Position
- das Abfahren einer vorgegebenen Strecke
- das Anfahren einer definierten Position

Als Grundlage für den Entwurf der Missionselemente für Einzelfahrzeuge dient, neben den gezeigten Punkten, die Syntax der Planungssprache des Programms SeeTrack. Diese textbasierte Sprache wird bereits auf verschiedenen industriell und militärisch genutzten Einzelplattformen eingesetzt und macht den Entwurf einer neuen Grundstruktur unnötig. Das auf Einzelfahrzeuge ausgelegte Missionskonzept wurde während dieser Arbeit so erweitert, dass es ein breites und erweiterbares Portfolio an Elementen für Fahrzeugverbände repräsentieren kann. Eine mit hohem Aufwand verbundene Softwareanpassung des fahrzeugspezifischen GREX-Interface-Moduls ist somit nicht notwendig, auch wenn neue Teammissionselemente eingefügt werden. Die in dieser Ebene

definierte Metasprache kann dadurch einen konstanten Umfang an Missionselementen besitzen.

Um die Komplexität auf der Fahrzeugebene weiter zu senken, besitzen alle Missionselemente, die einen Pfad beschreiben, identische Bestandteile in den Nebenelementzeilen, die im weiteren Verlauf als *Bewegungsparameter* bezeichnet werden. In Tabelle 3.3 sind diese Elemente eines Einzelmanövers kurz dargestellt und erläutert.

Tabelle 3.3: *Elemente der Bewegungsparameter*

Element	Beschreibung
Beschreibung	Beschreibung des Elements
Latitude, Longitude	anzufahrender Wegpunkt
Tiefenmodus	0 – Tiefe 1 – Höhe über Grund
Tiefe	Tiefe während des Manövers
Geschwindigkeitsreferenz	0 – Geschwindigkeit über Grund 1 – Geschwindigkeit durch Wasser
Geschwindigkeit	Geschwindigkeit für Manöver
Geschwindigkeitseinheit	0 – m/s 1 – Knoten
Wegpunkttyp	2 – exakte Pfadverfolgung 4 – nach Erreichen des Punktes warten
Wartezeit	Wartezeit nach Erreichen des Wegpunkts
minimale Tiefe	minimale Manövertiefe
maximale Tiefe	maximale Manövertiefe
Sensorbefehl	Steuerung von Fahrzeugsensorik

3.3.1 Punktmanöver

Das einfachste Einzelmanöver ist das Punktmanöver und dient der Definition einer abzufahrenden Strecke. Es wurde nahezu komplett aus der SeeTrack-Planungssprache übernommen und im Zuge der Einbettung in eine teamfähige Sprache um den Parameter *Epsilon* erweitert. Dieser Parameter wurde aus Kompatibilitätsgründen am Ende der Parameterliste angefügt und beschreibt eine erlaubte Abweichung vom anzufahrenden Punkt in Metern. Für ein Punktmanöver ergibt sich somit die folgende Syntax innerhalb einer Missionsdatei:

```
#POINT, Hauptelementnummer  
Nebenelementnummer, Bewegungsparameter, Epsilon
```

Innerhalb der GREX-Szenarien werden Punktmanöver als Warte- oder Pfadfolgema­növer genutzt. Um die gewünschte Ausrichtung dieses Elements festzulegen, wird der Eintrag *Wegpunkttyp* der Bewegungsparameter entsprechend angepasst. Die in den Bewegungsparametern, siehe Tabelle 3.3, angegebene Wartezeit ist dabei nur gültig insofern das Punktmanöver als Wartemanöver gekennzeichnet ist. Weiterhin wird auf die separate Angabe eines Startpunktes verzichtet. Es gilt daher jeweils der Endpunkt des vorherigen Manövers als Startpunkt des abzufahrenden Pfades.

3.3.2 Bogenmanöver

Um auch komplexere Einzelmanöver realisieren zu können, wurde neben dem Punktmanöver das Bogenmanöver definiert. Es beschreibt einen Kreisbogen, der sich, wie in Abbildung 3.3 dargestellt, über einen Mittel-, einen Start- sowie einen Endpunkt realisieren lässt. Da des Weiteren der Verlauf des Bogenmanövers benötigt wird, muss zusätzlich eine Drehrichtung angegeben werden.

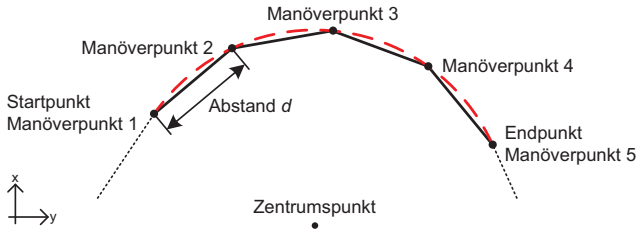


Abbildung 3.3: Aufbau eines Bogenmanövers für ein Einzelfahrzeug

Da nicht alle einzelautonomen Systeme in der Lage sind, auf Basis dieser Informationen einen Kreisbogen zu realisieren, wird das Manöver zusätzlich in mehrere Streckenabschnitte mit einer Länge d zerlegt. Die berechneten Manöverpunkte werden im Missionsplan über die Bewegungsparameter der Nebenelemente, siehe Abschnitt 3.2, eingebracht. Die Anzahl der Punkte ist dabei nicht begrenzt, sie müssen jedoch mindestens den Start- und den Endpunkt des Kreisbogens beinhalten. Die einzelnen Streckenabschnitte können dabei unterschiedliche Längen aufweisen, müssen jedoch zwingend größer sein als die minimale Distanz, die ein Fahrzeug zwischen zwei anzufahrenden Punkten benötigt. Ist dies nicht der Fall, können undefinierte Missionsverläufe die Folge sein, da Fahrzeuge Punkte überspringen oder nie erreichen können. Im Einzelmissionsplan besitzt ein Bogenmanöver bei der Zerlegung eines gegebenen Kreises in n Abschnitte folgenden Aufbau:

```
#ARC, Hauptelementnummer, Bogenparameter
Nebenelementnummer, Bewegungsparameter, Epsilon
Nebenelementnummer+1, Bewegungsparameter, Epsilon
...
Nebenelementnummer+n, Bewegungsparameter, Epsilon
```

In Tabelle 3.4 sind die benötigten Bogenparameter aufgeschlüsselt und in der verwendeten Reihenfolge kurz erläutert.

Tabelle 3.4: Elemente der Bogenparameter

Element	Beschreibung
Startlatitude, Startlongitude	Startpunkt des Bogens
Endlatitude, Endlongitude	Endpunkt des Bogens
Zentrumlatitude, Zentrumlongitude	Zentrumspunkt des Bogens
Drehrichtung	0 – im Uhrzeigersinn 1 – gegen den Uhrzeigersinn

Eine besondere Rolle spielt das Bogenmanöver für Online-Umplanungen einer Mission. Da trotz des festen Missionsdesigns eine flexible Missionsgestaltung ermöglicht werden soll, kann ein Bogenmanöver ersatzweise ein Punktmanöver repräsentieren. Für diesen Fall wird der Zentrumspunkt des Bogens auf den Wert der Platzhalterposition gesetzt. Da diese Position innerhalb einer Mission einmalig und global bekannt ist, kann dieser Zustand von allen Fahrzeugen ohne Probleme geprüft werden. Das Punktmanöver definiert somit den Start- und den Endpunkt des Bogenmanövers. Weiterhin werden in diesem Fall alle Positionen der Nebenelemente mit dem anzufahrenden Punkt ersetzt.

3.3.3 Passive Manöverelemente

Für die Realisierung von Teammissionen sind auf der Fahrzeugebene neben den Standardmanövern weitere Elemente notwendig. Diese beschreiben Aktionen, die ein Fahrzeug ausführen soll und dienen zum Synchronisieren von Manövern oder der Interpretation eines Fahrzeugmissionsplans im Kontext einer Teammission.

Das erste Spezialmanöver und gleichzeitig das erste Element eines Missionsplans ist das Initialisierungsmanöver, welches durch folgende Syntax beschrieben wird:

#INIT, Hauptelementnummer

Während dieses Manövers können fahrzeugspezifische Routinen zum Start des Systems abgearbeitet werden. Die Ausführung ist somit optional, bietet dem Fahrzeugbetreiber aber die Möglichkeit, missionsspezifische Einstellungen am Fahrzeug vorzunehmen oder entsprechende Sensorik zu initialisieren.

Um nach dem Beenden definierter Missionsabschnitte automatisiert Statusberichte der Fahrzeuge zu erhalten, wurde das Reportmanöver eingeführt. Die folgende Syntax zeigt den Aufbau eines derartigen Manövers im Einzelfahrzeugmissionsplan:

#REPORT, Hauptelementnummer

Weiterhin werden Missionselemente benötigt, die eine Verbindung zwischen dem Missionsplan der Einzelfahrzeuge und dem jeweiligen Teammissionsplan herstellen. Passive Manöverelemente können dies gewährleisten, werden dabei aber lediglich vom Teammanagement benötigt. Das einzelne Fahrzeug muss die den Elementen zugeordnete Information nicht verwerten, das Element jedoch verstehen, um Fehleinstufungen zu vermeiden.

Da eine Übersetzung komplexer Teamelemente lediglich über mehrere Einzelemente realisiert werden kann, muss eine Möglichkeit geschaffen werden, in einem Fahrzeugmissionsplan die einzelnen Elemente einem entsprechenden Teammissionselement zuordnen zu können. Daher wird jeder zusammengehörige Elementblock durch ein Referenzmanöver eingeleitet, welches die Hauptelementnummer des zugehörigen Teamelements enthält. Das dafür verwendete Referenzmanöver besitzt folgenden Aufbau:

#REFNO, Hauptelementnummer, zugehörige Teamelementnummer

Es stellt damit eine direkte Verbindung zwischen Team- und Fahrzeugmissionsplan her. Neben der eindeutigen Zuordnung verlangt das vorgestellte Missionskonzept zusätzlich, dass übersetzte Teamelemente bei allen Fahrzeugen mit der gleichen Hauptelementnummer beginnen. Da es, je nach Szenario, bei der Übersetzung eines Teammissions-

plans in einzelne Fahrzeugmissionspläne zu Unterschieden in der Anzahl von Hauptelementen und somit auch in der fortlaufenden Hauptelementnummerierung kommen kann, wird ein Synchronisationselement benötigt. Es weist innerhalb eines Missionsplans folgende Syntax auf:

```
#SYNC, Hauptelementnummer, zugehörige Teamelementnummer
```

Auf diese Art und Weise werden nicht nur die genannten Unterschiede ausgeglichen, es wird zusätzlich der Aufwand für die Koordination und Umplanung erheblich reduziert, da eine Synchronisation zwischen den einzelnen Fahrzeugplänen nicht erforderlich ist.

3.4 Missionselemente für Fahrzeugverbände

Nach der Definition der Einzelfahrzeugmanöver wurden in Kooperation mit dem Instituto Superior Técnico die Basiselemente für die entsprechende Teammissionssprache entwickelt. Diese Elemente beinhalten sowohl missionsspezifische Angaben als auch Missionsinformationen für alle an einem Szenario beteiligten Fahrzeuge und dienen dem Teammanagement zum Koordinieren der einzelnen Fahrzeuge während einer Mission. Der Aufbau der Teammissionssprache muss daher von den Fahrzeugherstellern bzw. der existierenden Fahrzeugsoftware nicht verstanden werden.

Neben der Entwicklung der Teamelemente stellt deren Übersetzung in die Elemente der Einzelfahrzeuge eine besondere Herausforderung dar. Wie in Abschnitt 3.3 besitzen diese ein statisches Vokabular, um Änderungen an der Softwarestruktur auf der Fahrzeugebene zu vermeiden. Als Basis für die Übersetzung wird die in allen Teamelementen enthaltene Prioritätsliste genutzt. Sie beschreibt in welcher Reihenfolge ein Teamelement Manöverinformationen für die einzelnen Fahrzeuge bereitstellt. Die Prioritätsliste enthält dabei ganze Zahlen von *Null* bis *Fahrzeuganzahl-1* und ist unabhängig von den Fahrzeugidentifikationsnummern. Jeder der Einträge in der Prioritätsliste

bezieht sich dabei auf die entsprechende Zeile der Fahrzeugliste, die sich im Kopfteil des Teammissionsplans befindet. Dadurch ist eine eindeutige Zuordnung gewährleistet. Ein weiterer Bestandteil aller aktiven Teamelemente ist das Formationsschema, welches ebenfalls die Einträge der Prioritätsliste nutzt, um die angestrebte Formation zu beschreiben. Abbildung 3.4 illustriert die Berechnung des Formationsschemas.

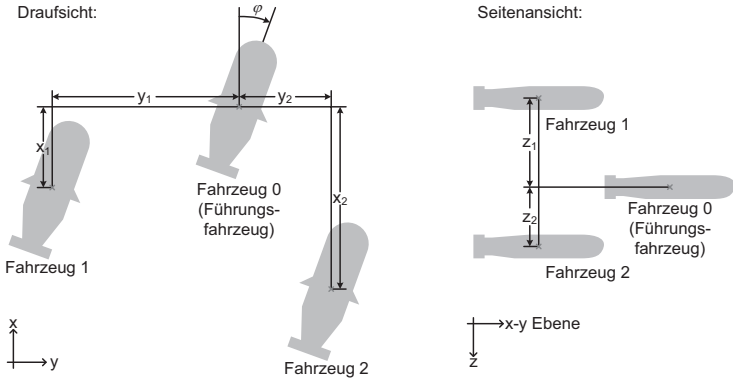


Abbildung 3.4: Aufbau des Formationsschemas eines Fahrzeugverbands

Im gezeigten Beispiel ist Fahrzeug 0 das Führungsfahrzeug und bestimmt damit den Nullpunkt der Formation. Abhängig davon werden entsprechend den Einträgen in der Prioritätsliste, die Abstände der weiteren Fahrzeuge in x -, y - und z -Richtung aufgelistet. Für die in Abbildung 3.4 gezeigte Zusammenstellung ergibt sich bei einer Prioritätsliste von $\{0, 2, 1\}$ das Formationsschema $\{-x_2, y_2, z_2, -x_1, -y_1, -z_1\}$. Wird eine Mission lediglich von nur einem Fahrzeug durchgeführt, ist das entsprechende Schema leer. Das Bestimmen des Formationsschemas ist dabei unabhängig vom Sollkurs des Fahrzeugverbands, welcher über den Winkel φ separat in den einzelnen Manöverelementen angegeben ist. Weiterhin muss beachtet werden, dass sowohl der *Sollkurs* als auch das *Formationsschema* lediglich auf den Abschluss eines Manövers bezogen sind. Die entsprechenden Startwerte ergeben sich durch das vorhergehende Manöver.

3.4.1 Punktmanöver

Das Punktmanöver beschreibt einen Sollpfad für eine Gruppe von Fahrzeugen, um einen vorgegebenen Punkt in Formation zu erreichen. Da innerhalb dieses Elements keine Formation aufgebaut wird, muss das vorherige Manöver nach dessen Abschluss eine Formation bereitstellen. Weiterhin dienen die Endpunkte des vorhergehenden Manövers als Startpunkte für das Punktmanöver, welches folgenden Aufbau aufweist:

```
#M_COORDINATEDPATHFOLLOWING_POINT, Hauptelementnummer, Prioritätsliste,  
    Sollkurs, Formationsschema, Zielpunkt des Führungsfahrzeugs  
Nebenelementnummer, Bewegungsparameter, Epsilon  
Nebenelementnummer+1, Bewegungsparameter, Epsilon  
...  
Nebenelementnummer+n-1, Bewegungsparameter, Epsilon
```

Um dieses Teamelement in die entsprechenden Einzelmissionselemente zu zerlegen, ist es notwendig, alle Nebenelementzeilen entsprechend der in der Prioritätsliste angegebenen Reihenfolge auszulesen. Die letzte Zeile mit der Nummer *Nebenelementnummer+n-1* beschreibt somit das Punktmanöver für das in der Prioritätsliste an der Stelle *n* gekennzeichnete Fahrzeug. Ein Punktmanöver darf in dieser Form nicht als Wartemanöver genutzt werden. Aus diesem Grund sind die Werte für *Wegpunkttyp=2* und *Wartezeit=0* der *Bewegungsparameter* vorgegeben. Da das Teammanagement im Einzelmissionsplan einen Bezug zum Teammissionsplan benötigt, wird zusätzlich ein Referenzmanöver vor dem übersetzten Element eingefügt. Somit ergibt sich nach der Übersetzung für ein Einzelmanöver folgende Syntax:

```
#REFNO, Hauptelementnummer, zugehörige Teamelementnummer  
#POINT, Hauptelementnummer+1  
Nebenelementnummer, Bewegungsparameter, Epsilon
```

Abschnitt A.1 zeigt anhand eines kurzen Beispiels die Verwendung dieses Elements innerhalb eines Missionsplans.

3.4.2 Bogenmanöver

Neben dem Punktmanöver bildet das Bogenmanöver das zweite Standardmanöver der Teamelemente. Es ist ebenfalls nicht formationsbildend und nutzt somit die Formation des vorhergehenden Manövers. Es besitzt einen an das Einzelement angelehnten Aufbau, welcher in Abschnitt 3.3 dargestellt ist, und wird durch folgende Syntax beschrieben:

```
#M_COORDINATEDPATHFOLLOWING_ARC, Hauptelementnummer, Prioritätsliste,
    Sollkurs, Formationsschema, Bogenparameter des Führungsfahrzeugs
Nebenelementnummer, Bewegungsparameter, Epsilon
Nebenelementnummer+1, Bewegungsparameter, Epsilon
...
Nebenelementnummer+2*n-1, Bewegungsparameter, Epsilon
```

Der durch die *Bogenparameter* beschriebene Kreis der Hauptelementzeile bezieht sich immer auf das Führungsfahrzeug. Um die relevanten Kreispunkte der weiteren Fahrzeuge nicht berechnen zu müssen, befinden sich in den Zeilen der Nebenelemente die Start- und Endpunkte der Kreisbahnen aller Fahrzeuge in Zweierpaaren. Diese sind entsprechend der *Prioritätsliste* geordnet. Die Zeile mit der Nummer $Nebenelementnummer+2*n-1$ beschreibt somit den Endpunkt des Kreises für das in der *Prioritätsliste* an der Stelle n gekennzeichnete Fahrzeug. In der Nebenelementzeile mit der Nummer $Nebenelementnummer+2*n-2$ findet sich dementsprechend der Kreisstartpunkt des genannten Fahrzeugs. Abbildung 3.5 skizziert den grundlegenden Aufbau dieses Elements.

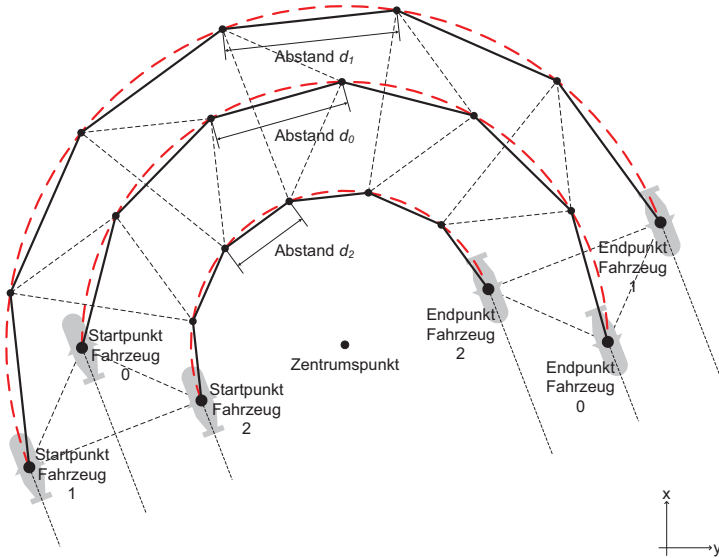


Abbildung 3.5: Aufbau des Bogenmanövers für einen Fahrzeugverband

Um während des gesamten Manövers eine Formation aufrechterhalten zu können, besitzen alle Kreisbahnen eines Bogenmanövers den gleichen Zentrumsunkt sowie einen identischen Öffnungswinkel. Im dargestellten Beispiel ist dieser 180 Grad. Daher kann es, wie in Abbildung 3.5 beim *Endpunkt Fahrzeug 0* ersichtlich, zu einem unsteten Verlauf des Missionsplans kommen. Dieser wird jedoch an dieser Stelle vernachlässigt. Die Manövergeschwindigkeit, die in den *Bewegungsparametern* angegeben wird, ist für alle Elemente gleich, gilt jedoch lediglich für den Kreisbogen mit der geringsten Länge. Der entsprechende Geschwindigkeitsausgleich, der benötigt wird, um während der Mission die Formation aufrecht zu erhalten, wird online über das Teammanagement eingebracht.

Um aus dem vorgestellten Teamelement die Einzelmanöver der Fahrzeuge herauszulesen, müssen jeweils die Informationen der zusammengehörigen Nebenelementpaare, der

Drehrichtung sowie des Zentrumspekts ausgewertet werden. Da ein Bogenmanöver für Einzelfahrzeuge zusätzlich eine Beschreibung des Bogens in Form von Streckenabschnitten enthält, ist es notwendig die entsprechenden Punkte zu berechnen. Abbildung 3.5 zeigt ein entsprechendes Beispiel. Des Weiteren wird vor dem eigentlichen Punktmanöver ein Referenzmanöver eingefügt, um den Bezug zum Teamelement herzustellen. Innerhalb eines Einzelmissionsplans weist ein Bogenmanöver somit folgende Syntax auf:

```
#REFNO, Hauptelementnummer, zugehörige Teamelementnummer
#ARC, Hauptelementnummer+1, Bogenparameter
Nebenelementnummer, Bewegungsparameter, Epsilon
Nebenelementnummer+1, Bewegungsparameter, Epsilon
...
Nebenelementnummer+k, Bewegungsparameter, Epsilon
```

Die Zeilen der Nebenelemente beschreiben den kompletten Kreisbogen – beginnend beim Startpunkt bis hin zum Endpunkt. Die Anzahl der Nebenelementzeilen $k+1$ und somit der Unterpunkte richtet sich nach der minimalen Strecke die fahrzeugseitig gefordert ist. Diese Distanz zwischen benachbarten Kreispunkten, in Abbildung 3.5 durch d_0 , d_1 und d_2 dargestellt, darf den minimal erforderlichen Wert nicht unterschreiten, um Probleme während der Ausführung zu vermeiden. Im Idealfall ist zusätzlich der Winkelabstand zwischen zwei Punkten auf einem Kreis identisch mit dem Abstand zwischen allen anderen Kreispunkten.

3.4.3 Mäanderförmiges Manöver

Ein mäanderförmiges Manöver ist eine Kombination aus Punkt- und Bogenmanövern, die alternierend auszuführen sind. Das Ziel dieses Manövertyps ist das Sammeln von Daten in einem definierten Gebiet, wodurch es vor allem bei Mess- und Suchmissionen

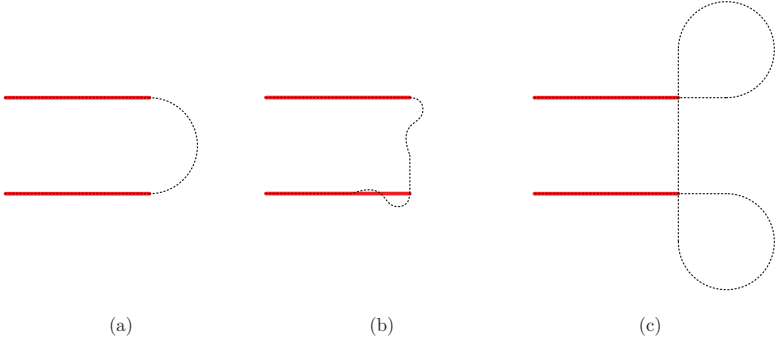


Abbildung 3.7: Wendemanöver autonomer maritimer Fahrzeuge

Um flexibel auf verschiedene Messkonstellationen reagieren zu können, wurden drei Wendestrategien definiert. Diese sind in Abbildung 3.8 auf Basis einer Dreiecksformation dargestellt.

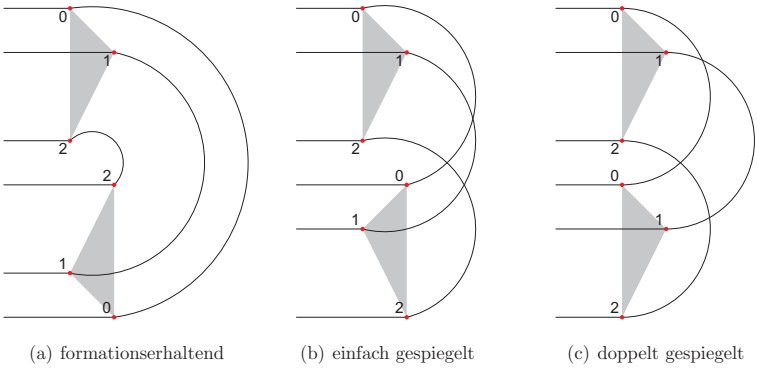


Abbildung 3.8: Wendestrategien innerhalb von Mäandermanövern

Entsprechend den Anforderungen einer Messmission ist es somit möglich, die Formation sowohl horizontal entlang der Bewegungsrichtung, siehe Abbildung 3.8(b), als auch vertikal zur Bewegungsrichtung, siehe Abbildung 3.8(c), zu spiegeln. Dies beeinflusst

die Fahrzeugkonstellation nach jedem Wendemanöver, bedarf aufgrund der sich kreuzenden Pfade jedoch eine Kollisionsüberwachung während der Missionsausführung.

Für die Umsetzung eines mäanderförmigen Manövers auf Teamebene wurde folgende Syntax realisiert:

```
#M_COORDINATEDPATHFOLLOWING_LAWNMOWER, Hauptelementnummer,  
    Prioritätsliste, Sollkurs, Formationsschema, Mäanderparameter  
Nebenelementnummer, Bewegungsparameter, Epsilon  
Nebenelementnummer+1, Bewegungsparameter, Epsilon  
...  
Nebenelementnummer+p-1, Bewegungsparameter, Epsilon  
Nebenelementnummer+p, Bewegungsparameter, Epsilon  
Nebenelementnummer+p+1, Bewegungsparameter, Epsilon  
...  
Nebenelementnummer+p*n-1, Bewegungsparameter, Epsilon
```

In der Hauptelementzeile finden sich neben der Beschreibung der Formation und Ausrichtung der Fahrzeuge alle den Mäander charakterisierenden Parameter. Diese sind in Tabelle 3.5 entsprechend der Reihenfolge ihrer Benutzung erläutert. Die Zeilen der Nebenelemente beschreiben blockweise die relevanten Manöverpunkte für alle Fahrzeuge, in der Reihenfolge der Einträge in der Prioritätsliste und jeweils beginnend mit dem Startpunkt des ersten Fahrzeugs. Nachfolgend finden sich abwechselnd die Start- und Endpunkte aller Bogenmanöver. Der jeweilige Block eines Fahrzeugs wird mit dem Endpunkt des mäanderförmigen Pfads abgeschlossen. In der gezeigten Syntax stellt p die Anzahl der relevanten Manöverpunkte eines Fahrzeugs dar, die Variable n beschreibt indirekt die Anzahl der Fahrzeuge. Die Zeile *Nebenelementnummer+p*n-1* beinhaltet somit den Endpunkt des in der Prioritätsliste an Stelle n aufgeführten Fahrzeugs.

Tabelle 3.5: Elemente der Mäanderparameter

Element	Beschreibung
Nordwestlatitude, Nordwestlongitude	obere linke Ecke des rechteckigen Aktionsbereichs des Manövers
Südostlatitude, Südostlongitude	untere rechte Ecke des rechteckigen Manövergebiets
Geradenanzahl	Anzahl der geraden Streckenelemente
Winkel	Rotationswinkel des Manövers
Geradenlänge	Länge der geraden Streckenelemente
Wenderadius	erster Wenderadius des Führungsfahrzeugs
Geradenabstand ungerade	Abstand zwischen erstem und zweitem Geradenstück des Führungsfahrzeugs
Geradenabstand gerade	Abstand zwischen zweitem und drittem Geradenstück des Führungsfahrzeugs
erste Drehrichtung	0 – Rechtsdrehung 1 – Linksdrehung
Mäandertyp	<i>nicht genutzt</i> (Standardwert: 0)
Verschiebung	Verschiebung der Geradenelemente zueinander
Streckenanzahl	Anzahl übereinanderliegender Manöver
Winkelversatz	Winkelversatz übereinanderliegender Manöver
Startlatitude, Startlongitude	Startpunkt des Führungsfahrzeugs
minimale Tiefe, maximale Tiefe	minimale/maximale Manövertiefe
minimale Tiefe in Küstennähe	<i>nicht genutzt</i> (Standardwert: 0)
Koppelnavigation	0 – Koppelnavigation nutzen 1 – Koppelnavigation nicht nutzen
Wendestrategie	0 – formationserhaltend 1 – einfach gespiegelte Formation 2 – doppelt gespiegelte Formation

Um eine Übersetzung in die entsprechenden Fahrzeugmissionspläne zu ermöglichen, ist es notwendig, nach dem Referenzmanöver, mit Bezug zum Teammissionselement, die einem Fahrzeug zugehörigen Bogenmanöver aus den jeweiligen Start- und Endpunkten zu berechnen. Abgeschlossen wird die Übersetzung mit einem Punktmanöver, welches den letzten Geradenabschnitt beschreibt. Somit ergibt sich für den Fahrzeugmissionsplan das folgende Format:

```
#REFNO, Hauptelementnummer, zugehörige Teamelementnummer
#ARC, Hauptelementnummer+1, Bogenparameter
Nebenelementnummer, Bewegungsparameter, Epsilon
...
Nebenelementnummer+k-1, Bewegungsparameter, Epsilon
#ARC, Hauptelementnummer+2, Bogenparameter
Nebenelementnummer+k, Bewegungsparameter, Epsilon
...
Nebenelementnummer+2*k-1, Bewegungsparameter, Epsilon
...
#ARC, Hauptelementnummer+p, Bogenparameter
Nebenelementnummer+(p-1)*k, Bewegungsparameter, Epsilon
...
Nebenelementnummer+p*k-1, Bewegungsparameter, Epsilon
#POINT, Hauptelementnummer+p+1
Nebenelementnummer+p*k, Bewegungsparameter, Epsilon
```

Die dargestellte Syntax betrachtet eine ideale Übersetzung eines mäanderförmigen Elements wobei p die Anzahl der Bogenmanöver und k die Anzahl der Bogensegmente ist. Somit ergibt sich für alle Bogenabschnitte eine identische Zahl an Nebenelementen.

Eine Spezialform des mäanderförmigen Manövers ist der Suchprozess. Der in Abbildung 3.6 durch das Manövergebiet 2 gekennzeichnete Bereich charakterisiert dessen

Aktionsbereich. Dieser umschließt alle Missionselemente, da in diesem Fall eine Datenaufnahme sowie -auswertung während der kompletten Laufzeit des Mäandermanövers notwendig ist. Wird bei diesen Messungen der manöverbezogene Schwellwert überschritten, so gilt der Suchprozess als erfolgreich abgeschlossen und das Folgemanöver wird initialisiert. Wird der Schwellwert während der Ausführung nicht erreicht, entspricht dieses Manöver einem Standardmäander. Ein Suchprozess bildet somit die Voraussetzung für Zielverfolgungsszenarien und beinhaltet im Vergleich zum Standardmäander zwei zusätzliche Parameter in den Nebenelementzeilen der Teamelemente. Diese sind in Tabelle 3.6 beschrieben.

Tabelle 3.6: Elemente der Suchparameter

Element	Beschreibung
Schwellwert	manöverbezogener Schwellwert
Sensorbefehl 2	manöverbezogener erweiterter Sensorbefehl

Neben dem angepassten Namen des Elements sowie den zusätzlichen Parametern ist der Aufbau des Suchprozesses identisch mit dem eines Standardmäanders und weist die folgende Form auf:

```
#M_SEARCHINGPROCESS, Hauptelementnummer,
    Prioritätsliste, Sollkurs, Formationsschema, Mäanderparameter
Nebenelementnummer, Bewegungsparameter, Epsilon, Suchparameter
Nebenelementnummer+1, Bewegungsparameter, Epsilon, Suchparameter
...
Nebenelementnummer+p-1, Bewegungsparameter, Epsilon, Suchparameter
Nebenelementnummer+p, Bewegungsparameter, Epsilon, Suchparameter
Nebenelementnummer+p+1, Bewegungsparameter, Epsilon, Suchparameter
...
Nebenelementnummer+p*n-1, Bewegungsparameter, Epsilon, Suchparameter
```

Sowohl der Suchprozess als auch das Standardmäandermanöver setzen eine bestehende Formation voraus (Beispiel: Abschnitt A.2). Als Startpunkte werden jeweils die Endpunkte des vorhergehenden Manövers genutzt, daher wird das erste Punktmanöver in keinem der Elemente separat aufgeführt. Aufgrund der missionsbezogenen Aufgabenstellung erfordert der Suchprozess im Missionsplan ein entsprechendes Zielverfolgungsmanöver als Folgeelement, da dies nach Erreichen des angegebenen Schwellwertes aktiviert wird. Der Schwellwert kann dabei ein sensorbezogener Messwert aber auch die Anzahl eingehender Nachrichten sein, die für die Geschwindigkeitsschätzung bei einer Zielverfolgung mindestens vorliegen müssen.

3.4.4 Manöver zur Zielverfolgung

Manöver zur Zielverfolgung werden nur nach der erfolgreichen Ausführung eines Suchprozesses angestartet und müssen somit im Missionsplan immer nach diesem aufgeführt sein. Sie unterteilen sich dabei in zwei grundlegende Manövertypen, um sowohl Suchaufgaben als auch eine direkte Verfolgung von Zielen realisieren zu können. Im Fall einer direkten Zielverfolgung mit n Fahrzeugen besitzt das Element auf Teamebene folgende Syntax:

```
#M_COOPERATIVETARGETPURSUIT, Hauptelementnummer,  
    Einsatzgebietsspezifikation, Prioritätsliste, Sollkurs,  
    Formationsschema, Verfolgungsparameter  
Nebenelementnummer, Bewegungsparameter, Epsilon, Suchparameter  
Nebenelementnummer+1, Bewegungsparameter, Epsilon, Suchparameter  
...  
Nebenelementnummer+n-1, Bewegungsparameter, Epsilon, Suchparameter
```

Die Hauptelementzeile dieses Elements beinhaltet neben den Standardparametern zusätzlich eine Beschreibung des relevanten Manövergebiets sowie Angaben zur Objekt-

verfolgung, welche in Tabelle 3.7 näher erläutert sind. Das Einsatzgebiet muss sich dabei zwingend innerhalb des globalen Missionsgebiets befinden, um einen frühzeitigen Abbruch des Manövers durch Erreichen der Gebietsgrenze zu vermeiden. Um auf Wunsch der Fahrzeugbetreiber weitere Sensorik des Fahrzeugs ansprechen zu können, beinhalten die Nebenelementzeilen zusätzlich die in Tabelle 3.6 beschriebenen *Suchparameter*, wobei der Eintrag des manöverbezogenen Schwellwerts nicht genutzt wird und standardmäßig den Wert 0 besitzt. Da des Weiteren eine Startposition für das Verfolgungsmanöver vorab nicht festgelegt werden kann, enthalten alle *Bewegungsparameter* die Koordinate der Platzhalterposition.

Tabelle 3.7: Elemente der Verfolgungsparameter

Element	Beschreibung
Verfolgungsart	0 – exakte Verfolgung des Pfads des Zielobjekts ohne Beachtung der Entfernung 1 – exakte Verfolgung des Pfads des Zielobjekts unter Einhaltung der festgelegten Entfernung 2 – Sichtlinienverfolgung (Line of Sight) des Zielobjekts ohne Beachtung dessen Pfads, aber unter Einhaltung der festgelegten Entfernung
Ziel-ID	Identifikationsnummer des Zielobjekts (0 für allgemeines Zielobjekt)
Entfernung zum Ziel	Entfernung die zum Zielobjekt gehalten werden soll

Neben der Startposition ist auch der Verlauf einer Zielverfolgung vorab nicht planbar, was bei der Übersetzung in die entsprechenden Fahrzeugmanöver beachtet werden muss. Im Missionsplan eines Einzelfahrzeugs ergeben sich somit nach dem Referenzmanöver ein Punkt- und zwei Bogenmanöver. Dabei gilt es zu beachten, dass das Punktmanöver durch die Festlegung von *Wegpunkttyp=4* als Wartemanöver gekennzeichnet ist. Weiterhin besitzen die verwendeten Bogenmanöver jeweils sieben Nebenelementzeilen. Diese werden während der Ausführung alternierend vom Fahrzeug ausgeführt und vom Teammanagement umgeplant, sind vorab jedoch an den statischen Missi-

onsaufbau gebunden. Des Weiteren beinhalten alle Koordinaten in der Übersetzung die Platzhalterposition, um eine Prüfbarkeit durch die Fahrzeuge zu gewährleisten, trotz des fehlenden Manöverablaufs. Für die Übersetzung des Teamelements in die Fahrzeugmissionsprache ergibt sich somit folgende Syntax:

```
#REFNO, Hauptelementnummer, zugehörige Teamelementnummer
#POINT, Hauptelementnummer+1
Nebenelementnummer, Bewegungsparameter, Epsilon
#ARC, Hauptelementnummer+2, Bogenparameter
Nebenelementnummer+1, Bewegungsparameter, Epsilon
...
Nebenelementnummer+7, Bewegungsparameter, Epsilon
#ARC, Hauptelementnummer+3, Bogenparameter
Nebenelementnummer+8, Bewegungsparameter, Epsilon
...
Nebenelementnummer+14, Bewegungsparameter, Epsilon
```

Der zweite Manövertyp, der innerhalb dieser Gruppe von Teamelementen entwickelt wurde, umfasst ein Manöver für Suchaufgaben, wie das Auffinden von Unterwasserquellen oder Schadstoffeinspeisungen. Der Aufbau des Teamelements ist angelehnt an das Standardmanöver zur Zielverfolgung, benötigt aber keine *Verfolgungsparameter*, wodurch sich die folgende Syntax für eine Anzahl von n Fahrzeugen ergibt:

```
#M_APPROACHING, Hauptelementnummer, Einsatzgebietsspezifikation
    Prioritätsliste, Sollkurs, Formationsschema
Nebenelementnummer, Bewegungsparameter, Epsilon, Suchparameter
Nebenelementnummer+1, Bewegungsparameter, Epsilon, Suchparameter
...
Nebenelementnummer+n-1, Bewegungsparameter, Epsilon, Suchparameter
```

Da auch bei diesem Manöver der Verlauf nicht vorab geplant werden kann, enthalten alle Koordinaten der Nebenelementzeilen lediglich die Platzhalterposition. Der Aufbau der entsprechenden Einzelmanöver ist identisch mit denen des Manövers zur Zielverfolgung.

Abschnitt A.2 zeigt anhand eines kurzen Beispiels die Verwendung dieses Elements innerhalb eines Missionsplans.

3.4.5 Manöver zum Einnehmen einer definierten Formation

Da das vorgestellte Missionskonzept unter anderem eine bestehende Formation voraussetzt, wird ein formationsbildendes Manöver benötigt. Über dieses wird eine Formation aller an einer Mission teilnehmenden Fahrzeuge realisiert oder während der Missionsausführung die Formation gewechselt. Weiterhin ist nur über dieses Manöver der Wechsel des Führungsfahrzeugs möglich. Auf der Teamebene wird das Standardmanöver zum Einnehmen einer definierten Formation für n Fahrzeuge mit folgender Syntax beschrieben:

```
#M_GOTOFORMATION, Hauptelementnummer, Prioritätsliste,
    Sollkurs, Formationsschema
Nebenelementnummer, Bewegungsparameter, Epsilon
Nebenelementnummer+1, Bewegungsparameter, Epsilon
...
Nebenelementnummer+n-1, Bewegungsparameter, Epsilon
```

Die Zeilen der Nebenelemente beschreiben dabei den jeweiligen Endpunkt der einzelnen Fahrzeuge, geordnet entsprechend der Einträge in der Prioritätsliste. Weiterhin ist es in diesem Missionselement gestattet, die Reihenfolge der Fahrzeuge zu ändern bzw. ein neues Führungsfahrzeug festzulegen. Die in diesem Manöver vorgenommenen

Änderungen behalten bis zum nächsten formationsbildenden Element ihre Gültigkeit. Da dieses Element während der Ausführung komplexe Umplanungen erfordert, ist es nicht ausreichend, lediglich den definierten Zielpunkt im Fahrzeugmissionsplan umzusetzen. Aus diesem Grund besteht ein formationsbildendes Manöver auf Fahrzeugebene aus den folgenden Teilen:

```
#REFNO, Hauptelementnummer, zugehörige Teamelementnummer
#POINT, Hauptelementnummer+1
Nebenelementnummer, Bewegungsparameter, Epsilon
#ARC, Hauptelementnummer+2, Bogenparameter
Nebenelementnummer+1, Bewegungsparameter, Epsilon
...
Nebenelementnummer+7, Bewegungsparameter, Epsilon
#ARC, Hauptelementnummer+3, Bogenparameter
Nebenelementnummer+8, Bewegungsparameter, Epsilon
...
Nebenelementnummer+14, Bewegungsparameter, Epsilon
#POINT, Hauptelementnummer+4
Nebenelementnummer+15, Bewegungsparameter, Epsilon
```

Den Anfang bildet nach dem Referenzelement ein Punktmanöver, welches durch den Parameter *Wegpunkttyp*=4 als Wartemanöver eingesetzt wird. Somit ist gewährleistet, dass die umgesetzte Algorithmik für die Berechnung der optimalen Wege zum Formationsaufbau ausreichend Zeit zur Verfügung hat, ohne dass kritische Situationen auftreten können. Um die berechneten Pfade umzusetzen, folgen auf das Punktmanöver zwei Bogenmanöver. Diese können alternierend vom Fahrzeug ausgeführt und vom Teammanagement umgeplant werden, bis der berechnete Pfad abgefahren bzw. die Zielposition erreicht wurde. Da der Missionsaufbau statisch ist, kann die Anzahl der Nebenelementzeilen nicht verändert werden und ist auf sieben festgesetzt. Ob ein Bogenmanöver als Punktmanöver interpretiert wird, kann, wie in Unterabschnitt 3.3.2

beschrieben, über die Verwendung der Platzhalterposition anstelle des Zentrums punktes in den jeweiligen Bogenparametern eines Kreises bestimmt werden. Auf diese Weise lassen sich sowohl Kreis- als auch gerade Streckenabschnitte realisieren. Das abschließende Element wird durch ein Punktmanöver realisiert. Dies dient zum einen der zusätzlichen Sicherheit, da im Falle einer Störung der alternierenden Ausführung der Bogenmanöver lediglich dieser Punkt angefahren wird. Auf der anderen Seite dient dieses Punktmanöver als Startpunkt für das folgende Element im Missionsplan. Im Initialzustand beinhalten alle Elemente dieses Manövers den angestrebten Zielpunkt des jeweiligen Fahrzeugs. Des Weiteren sind die Bogenmanöver zur Ausführung als Punktmanöver konfiguriert.

Einen Sonderfall bildet das letzte Element eines Missionsplans, welches zwingend formationsbildend sein muss. Auf diesem Weg ist sichergestellt, dass sich die Fahrzeuge nach Abschluss einer Mission an definierten Punkten befinden. Auf Teamebene ist der grundlegende Aufbau identisch mit dem Standardmanöver, lediglich die Benennung ist angepasst, wodurch sich folgende Syntax ergibt:

```
#M_FINAL, Hauptelementnummer, Prioritätsliste,
    Sollkurs, Formationsschema
Nebenelementnummer, Bewegungsparameter, Epsilon
Nebenelementnummer+1, Bewegungsparameter, Epsilon
...
Nebenelementnummer+n-1, Bewegungsparameter, Epsilon
```

Die Übersetzung des finalen Missionselements ist weitestgehend identisch mit der des Standardmanövers. Zu beachten ist, dass neben dem ersten auch das letzte Punktmanöver als Wartemanöver konfiguriert ist. Weiterhin ist in den Bewegungsparametern der Eintrag *Tiefe=0* festgesetzt, da sich die Fahrzeuge nach Abschluss der Mission an der Wasseroberfläche befinden sollen. In den Abschnitten A.1 bis A.3 wird die Verwendung der vorgestellten Elemente innerhalb eines Missionsplans verdeutlicht.

3.4.6 Hierarchisch gestufte Manöver

Im Gegensatz zu den bisher beschriebenen Manövertypen realisieren hierarchisch gestufte Manöver eine komplexe Elementstruktur aus mehreren Untermanövern. Das Fahrzeugteam wird dabei in Untergruppen aufgeteilt, denen unterschiedliche Missionsteile zugeordnet werden können. Ausgangspunkt für die Entwicklung dieses Missionselements bildet das Szenario der Meereskartographierung. Ein Fahrzeugteam übernimmt dabei einen grob aufgelösten Scan des Meeresbodens, welche online von einem Beobachter begutachtet werden. Findet sich eine relevante Stelle, wird eine zweite, in sicherer Entfernung wartende Gruppe aktiviert, die an dieser Stelle einen hochauflösenden Scan durchführt. Abbildung 3.9 verdeutlicht das beschriebene Szenario.

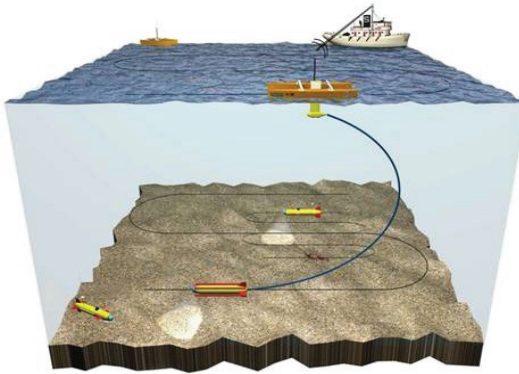


Abbildung 3.9: GREX-Missionsszenario zur Meereskartographierung, Quelle: Instituto Superior Técnico (Lissabon, Portugal)

Um nicht auf ein spezielles Szenario eingegrenzt zu sein, wurde eine allgemeine Beschreibung für derartige Manöver entwickelt. Die Aktivitäten der Untergruppen sind damit im Rahmen der definierten Missionselemente frei wählbar und können separat konfiguriert werden. Für eine Unterteilung des Fahrzeugteams in n Gruppen ergibt sich für die Beschreibung eines hierarchisch gestuften Manövers folgende Syntax:

```
#M_HIERARCHICTRIGGEREDACTIVITIES, Hauptelementnummer,  
    Prioritätsliste 1, Sollkurs 1, Formationsschema 1, ...,  
    Prioritätsliste n, Sollkurs n, Formationsschema n  
#GROUP, Hauptelementnummer+1, Gruppennummer, Gruppenparameter 1  
<Aktionsparameter Gruppe 1>  
...  
#GROUP, Hauptelementnummer+q+1, Gruppennummer+n-1, Gruppenparameter n  
<Aktionsparameter Gruppe n>  
#END_HIERARCHICTRIGGEREDACTIVITIES, Hauptelementnummer+k
```

Die Syntax verdeutlicht die Unterteilung des Teams in einzelne Gruppen, welche in der ersten Hauptelementzeile ihre Basisparameter erhalten. Somit kann für jede Untergruppe ein separates Formationsschema sowie ein separater Sollkurs angegeben werden. Weiterhin wird über die Prioritätsliste die Rangfolge der Fahrzeuge in der jeweiligen Gruppe festgelegt. Die darauf folgenden Zeilen weisen eine detaillierte Beschreibung der festgelegten Untergruppen auf.

Der Beginn einer Gruppenbeschreibung ist dabei jeweils mit dem Element *#GROUP* gekennzeichnet. Innerhalb der Beschreibung wird die Gruppe nummeriert und über die Gruppenparameter, die in Tabelle 3.8 in der Reihenfolge ihrer Nutzung aufgeführt sind, konfiguriert. Handelt es sich um die erste Gruppe (Führungsgruppe), sind die Parameter *Bereitschaftsmodus*=3 und *Auslöseimpuls*=3 fest vorgegeben, da diese keine weiteren externen Steuerimpulse empfangen kann. Für jede weitere Untergruppe werden in den Gruppenparametern benutzerdefinierte Einstellungen vorgenommen, die zum Aktivieren der Gruppe führen. Weiterhin wird über die Warteposition bzw. die Entfernung zur vorherigen Gruppe der verwendete Bereitschaftsmodus konfiguriert. Das der Gruppe zugeordnete Missionselement, welches nur für die jeweilige Gruppe gilt, findet sich in den folgenden Zeilen und ist in der Syntax durch den Eintrag *Aktionsparameter* gekennzeichnet. Sie beinhalten ein Standardelement aus den Abschnitten 3.4.1 bis 3.4.3. Auf weitere Manöverstrukturen wird in dieser Arbeit nicht eingegangen.

Tabelle 3.8: *Elemente der Gruppenparameter*

Element	Beschreibung
Bereitschaftsmodus	0 – der Führungsgruppe in definierter Entfernung folgen 1 – an definierter Position warten 2 – an definierter Position warten; Führungsgruppe folgen, wenn Kommunikationsverlust droht 3 – nicht verfügbar (Führungsgruppe)
Bereitschaftsparameter	Warteposition, Tiefe und Entfernung zur vorhergehenden Gruppe im Format {Latitude, Longitude, Tiefe, Entfernung}
Auslöseimpuls	Startimpuls für untergeordnete Gruppe 0 – manuell durch den Anwender 1 – automatisch durch Erreichen des Schwellwerts 2 – automatisch durch Erreichen des Pfadendes 3 – nicht verfügbar (Führungsgruppe)
Fahrzeuganzahl	gibt an, wie viele Fahrzeuge der aktuellen Gruppe die Untermission ausführen 0 – komplette Gruppe n – nur die ersten n in der Prioritätsliste aufgeführten Fahrzeuge, die weiteren warten auf den folgenden Impuls
Schwellwert	missionsspezifischer Schwellwert zum Auslösen des Startimpulses für die untergeordnete Gruppe

Im Allgemeinen erlauben die Aktionsparameter jedes aktive Teamelement, wodurch sich beliebig komplexe Missionen realisieren lassen. Um eine fehlerfreie Lesbarkeit des Missionsplans sicherzustellen und die verwendeten Aktionsparameter von den Folge-Manövern zu trennen, wird das hierarchisch gestufte Manöver separat über das Element `#END_HIERARCHICTRIGGEREDACTIVITIES` abgeschlossen. Des Weiteren können für die einzelnen Gruppen unterschiedliche Submanöver verwendet werden, wodurch sich die Hauptelementnummerierung dieses Manövers nicht immer gleichmäßig ändert. Die Parameter q und k der Syntaxbeschreibung verdeutlichen dies. Eine besondere Bedeutung findet dieser Sachverhalt bei der Übersetzung dieses Manövers in die entsprechenden Einzelmissionselemente, da gemäß Definition die einzelnen Manöverabschnitte in allen Fahrzeugmissionsplänen mit der gleichen Hauptelementnummer beginnen müssen. Um dies zu gewährleisten, werden Unterschiede der Nummerierung im Einzelmissionsplan durch das Einfügen von Synchronisationselementen ausgeglichen. Als Referenz dient dabei der Einzelmissionsplan, dessen Übersetzung des Teammanövers die größte Anzahl an Hauptelementen aufweist. Besitzen alle Pläne eine identische Anzahl, wird kein Synchronisationsmanöver benötigt. Somit ergibt sich für die Übersetzung eines gestuften Manövers auf Fahrzeugebene die folgende Syntax, insofern der Referenzmissionsplan für das aktuelle Manöver k mehr Hauptelemente besitzt:

```
#REFNO, Hauptelementnummer, zugehörige Teamelementnummer
#POINT, Hauptelementnummer+1
Nebenelementnummer, Bewegungsparameter, Epsilon
<übersetzte Aktionsparameter>
#SYNC, Hauptelementnummer+q, zugehörige Teamelementnummer
...
#SYNC, Hauptelementnummer+q+k, zugehörige Teamelementnummer
```

Der Parameter q beschreibt dabei die Anzahl der Hauptelemente der übersetzten Aktionsparameter. Eine separate Auflistung der zugehörigen Übersetzungssyntax ist an dieser Stelle nicht notwendig. Dieser ist identisch mit den in diesem Kapitel vorgestell-

ten Methoden. Weiterhin muss bei einer Übersetzung die Art der Gruppen beachtet werden. Handelt es sich nicht um die Führungsgruppe, ist das erste Punktmanöver der Zeile *Hauptelementnummer+1* in den entsprechenden Bewegungsparametern durch *Wegpunkttyp=4* als Wartemanöver mit der Endposition des vorhergehenden Missionselements zu definieren. Auf diese Weise ist sichergestellt, dass sich das Team während der Ausführung koordiniert in die einzelnen Gruppen aufspalten kann. Um für die erste Gruppe des gestuften Manövers einen kontinuierlichen Missionsverlauf zu schaffen, wird das Punktmanöver mit dem *Wegpunkttyp=2* parametrier.

Durch die komplexe Ausrichtung dieses Manövertyps geht die Grundformation des Fahrzeugverbands während der Ausführung verloren. Daher fordert ein hierarchisch gestuftes Teamelement zwingend ein formationsbildendes Manöver als Folgeelement. Das im Abschnitt A.3 gezeigte Beispiel verdeutlicht dies.

3.4.7 Passive Manöverelemente

Neben den aktiven Manöverelementen werden für die Ausführung einer Teammission verschiedene passive Elemente benötigt. Das Initialisierungsmanöver beschreibt, wie schon auf der Einzelfahrzeugebene, einen spezifischen Startprozess und bildet das erste passive Missionselement auf Teamebene. Dieser besteht aus mehreren Teilen und beginnt jeweils mit dem Halten der aktuellen Position. Anschließend können fahrzeugeigene Startroutinen und Prüfprozesse ausgeführt werden, um anschließend dem Teammanagement die Bereitschaft des Fahrzeugs zu signalisieren. Da auf der Teamebene dahingehend keine weiteren missionsspezifischen Angaben benötigt werden, besitzt das Initialisierungsmanöver im Teammissionsplan lediglich folgenden Aufbau:

#M_INIT, Hauptelementnummer, Epsilon

Der Parameter *Epsilon* beschreibt dabei die erlaubte Abweichung von der angestrebten Halteposition. Da diese Position während der Planung nicht bekannt ist, wird sie nicht

in der Syntax dieses Elements eingebracht. Entsprechend des definierten Ablaufs des Initialisierungsmanövers, gestaltet sich die Übersetzung in einen Fahrzeugmissionsplan und weist somit folgende Syntax auf:

```
#REFNO, Hauptelementnummer, zugehörige Teamelementnummer
#POINT, Hauptelementnummer+1
Nebenelementnummer, Bewegungsparameter, Epsilon
#INIT, Hauptelementnummer+2
#REPORT, Hauptelementnummer+3
```

Zu beachten ist, dass das zugehörige Punktmanöver als Wartemanöver definiert ist und zum Zeitpunkt der Planung lediglich die Platzhalterposition enthält. Die reale Position der Wasserung ist bis zum Start der Mission nicht bekannt und wird vom Teammanagement vor dem Ausführen des eigentlichen Missionsplans online ersetzt.

Das zweite passive Element auf der Teamebene ist das Manöver zur Funktionssteuerung. Es erlaubt den an einer Mission teilnehmenden Fahrzeugen, zwischen einzelnen Missionselementen gesonderte Befehle zu erteilen. Entsprechend der Funktion dieses Elements besitzt die Syntax folgenden Aufbau:

```
#M_SETFUNCTIONALITY, Hauptelementnummer, Sensorbefehl Fahrzeug 1,
    Sensorbefehl Fahrzeug 2,...,Sensorbefehl Fahrzeug n,
    allgemeiner Befehl
```

Die Variable n kennzeichnet dabei die Anzahl der Missionsteilnehmer. Über den letzten Parameter der Befehlszeile ist zusätzlich die Umsetzung eines allgemeinen Befehls für alle Fahrzeuge gewährleistet. Eine Übersetzung dieses Teamelements in entsprechende Einzelfahrzeugmanöver ist nicht notwendig, da die enthaltenen Befehle lediglich auf der Teamebene ausgewertet und an das Fahrzeug gesendet werden.

3.5 Zusammenfassung

Dieses Kapitel beschreibt die Entwicklung einer teamorientierten Missionssprache auf Basis von definierten Missionselementen und damit die Voraussetzung für die Koordination von Verbänden kooperierender Systeme. Innerhalb der entwickelten Missionsstruktur werden sowohl die Fähigkeiten unterschiedlicher einzelautonomer Systeme als auch die Restriktionen der Fahrzeugbetreiber und -hersteller berücksichtigt und durch ein dreistufiges Konzept repräsentiert. Die erste Stufe bilden die Teammissionspläne in einer GREX-Metasprache auf Basis definierter Missionselemente. Das Missionselementportfolio ist flexibel erweiterbar und in der vorliegenden Arbeit auf die GREX-Missionsszenarien beschränkt. Die zweite Stufe bilden die Missionspläne der Einzelfahrzeuge, welche aus dem jeweiligen Teammissionsplan erzeugt werden. Diese basieren ebenfalls auf Missionselementen in einer GREX-Metasprache, weisen jedoch ein konstantes Elementportfolio auf. Dies bildet die Grundlage der dritten Stufe des Konzepts, der Prüfung und Übersetzung der Einzelmissionspläne in die entsprechende fahrzeugeigene Missionssprache. Durch den gewählten Ansatz wird somit eine hohe Variabilität erreicht, die auf der einen Seite unterschiedliche Missionsszenarien ermöglicht, auf der anderen Seite die Komplexität einer Teammission jedoch nicht an die Einzelsysteme weiterleitet. Des Weiteren bildet das vorgestellte Missionsdesign die Voraussetzung für die in Kapitel 4 entwickelte softwaregestützte Missionsplanung.

4 Missionsplanung für Fahrzeugverbände

Einen weiteren wichtigen Schritt für die Realisierung kooperierender Fahrzeugverbände stellt neben der in Kapitel 3 beschriebenen Entwicklung der Missionssprache die Planung einer Teammission dar. Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Entwicklung einer softwaregestützten Missionsplanung für Teams autonomer maritimer Fahrzeuge. Als thematische Schwerpunkte stehen dabei vor allem die im GREX-Projekt angestrebten Missionsszenarien sowie die Anwenderfreundlichkeit des Programms im Vordergrund. Der zweite Teil dieses Kapitels behandelt eine formationstreue Hindernisvermeidung von bekannten Objekten durch mehrere Fahrzeuge. Somit ist es möglich, während der Planungsphase einen Missionsplan auf Kollisionsfreiheit zu prüfen oder automatisiert einen hindernisfreien Plan zu erzeugen.

4.1 Planungskonzept

Die Grundlage für eine teamorientierte Missionsplanung bildet neben der Entwicklung der Missionssprache das Aufstellen eines passenden Planungskonzepts. Beide Entwicklungsschritte lassen sich dabei nicht klar voneinander trennen, da sie sich gegenseitig beeinflussen und aufeinander abgestimmt sein müssen. Im Fokus des Planungskonzepts steht dabei, mit Hilfe der in Abschnitt 3.4 beschriebenen Missionselemente, eine

szenarienbasierte Missionsplanung zu ermöglichen. Des Weiteren sollen Anwender ohne große Einarbeitungszeit in der Lage sein, das Missionskonzept zu verstehen und anzuwenden.

4.1.1 Planungstechnische Einordnung der Teammissionselemente

Eine Kategorisierung der vorgestellten Teammissionselemente stellt den ersten Schritt des erforderlichen Prozesses dar und ist in Abbildung 4.1 dargestellt.

	M_INIT (Initialisierungsmanöver, siehe Unterabschnitt 3.4.7)
	M_SETFUNCTIONALITY (Manöver zur Funktionssteuerung, siehe Unterabschnitt 3.4.7)
	M_GOTOFORMATION (Formationsbildendes Manöver, siehe Unterabschnitt 3.4.5)
	M_FINAL (Formationsbildendes Manöver, siehe Unterabschnitt 3.4.5)
	M_SEARCHINGPROCESS (Mäanderförmiges Manöver, siehe Unterabschnitt 3.4.3)
	M_APPROACHING (Manöver zur Zielverfolgung, siehe Unterabschnitt 3.4.4)
	M_COOPERATIVETARGETPURSUIT (Manöver zur Zielverfolgung, siehe Unterabschnitt 3.4.4)
	M_COORDINATEDPATHFOLLOWING_LAWNMOWER (Mäanderförmiges Manöver, siehe Unterabschnitt 3.4.3)
	M_COORDINATEDPATHFOLLOWING_ARC (Bogenmanöver, siehe Unterabschnitt 3.4.2)
	M_COORDINATEDPATHFOLLOWING_POINT (Punktmanöver, siehe Unterabschnitt 3.4.1)
	M_HIERARCHICTRIGGEREDACTIVITIES (Hierarchisch gestuftes Manöver, siehe Unterabschnitt 3.4.6)

Symbolerklärung: (**erfordert**, **stellt bereit**):

	darf nur als erstes Element im Missionsplan eingesetzt werden		Element darf nur hinter einem Element eingesetzt werden, welches eine Formation bereitstellt
	darf nur als abschließendes Element im Missionsplan eingesetzt werden		Element darf nur hinter einem Element eingesetzt werden, welches einen Suchprozess realisiert
	Element darf nur als Zwischenelement eingesetzt werden		Element wird in Formation abgeschlossen und erfordert ein formationsbildendes Folgeelement
	Element wird in Formation abgeschlossen		Element beschreibt einen Suchprozess und wird in Formation abgeschlossen

Abbildung 4.1: Planungstechnische Einordnung der Teammissionselemente

Dabei zeigt sich deutlich die formationsorientierte Struktur der Einteilung, die den GREX-Einsatzszenarien geschuldet ist. Sie ermöglicht eine einfache Zusammenstellung der Elemente und vereinfacht somit den Prozess der Missionsplanung. Um die Zuordnung zu erleichtern, sind die in Abbildung 4.1 dargestellten Missionselemente mit der im Missionsplan angewandten Syntax aufgelistet. Jedes Manöver besitzt definierte Anforderungen oder erfüllt nach Abschluss bestimmte Voraussetzungen, welche von nachfolgenden Elementen genutzt werden können. Manöver wie *M_APPROACHING*, die nach Abschluss keine definierte Formation besitzen, erfordern zwingend ein formationsbildendes Element wie *M_GOTOFORMATION* als Folgeelement. Einen Sonderfall bildet das Teamelement *M_COOPERATIVETARGETPURSUIT*, welches eine Zielverfolgung repräsentiert. Dieses Manöver wird mit einer definierten Formation beendet. Da die Pfade zur Realisierung einer aktiven Zielverfolgung jedoch online berechnet werden, ist die Endposition der Fahrzeuge nach dem Beenden des Missionselements unbekannt. Aus diesem Grund erfordert es ebenfalls ein formationsbildendes Folgeelement, um einen definierten Abschluss oder eine Fortsetzung der Missionsplanung zu ermöglichen. Weiterhin erfordert *M_COOPERATIVETARGETPURSUIT* einen Suchprozess, um ausgeführt werden zu können. Realisiert wird dieser durch das Element *M_SEARCHINGPROCESS*, welches aus Gründen der Flexibilität ein separates Teamelement darstellt. Somit kann es ebenfalls von *M_APPROACHING* genutzt werden, welches nur nach einem Suchprozess ausgeführt werden kann. Elemente wie *M_INIT*, die lediglich Funktionen beschreiben, müssen sich am Anfang eines Missionsplans befinden oder können wie *M_SETFUNCTIONALITY* zwischen Elementen eingefügt werden.

4.1.2 Formationstreue und Pfadplanung

Neben der Einordnung der vorgestellten Missionselemente ist es notwendig, definierte Richtlinien für die Pfadplanung festzulegen, um einen reibungslosen Missionsverlauf zu gewährleisten. Den Ausgangspunkt dafür bildet der formationsorientierte Ansatz,

der in den GREX-Einsatzszenarien verfolgt wird. Die Planung einzelner Fahrzeugpfade muss daher die festgelegte Formation und Ausrichtung eines Fahrzeugverbands beachten. Abbildung 4.2 verdeutlicht dies grafisch.

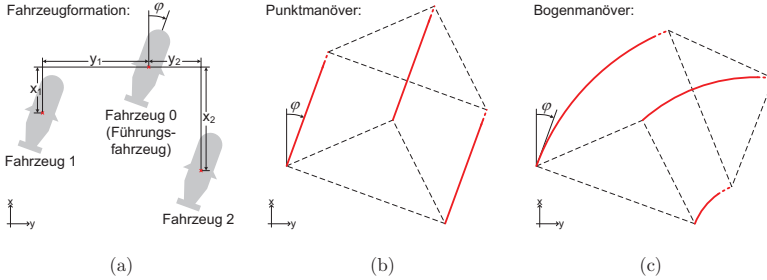


Abbildung 4.2: Einfluss der Formation auf zu planende Pfadabschnitte

Ist die in Abbildung 4.2(a) dargestellte Fahrzeugformation gegeben, so muss ein auf dieser Formation aufbauendes Punktmanöver die in Abbildung 4.2(b) gezeigte Form aufweisen. Ausgehend von den Sollpositionen der Fahrzeuge sind die einzelnen Pfade entsprechend des Sollkurses φ der Fahrzeuge zu planen. Die Länge der einzelnen Fahrzeugpfade muss dabei identisch sein, um eine formationstreue Abfahrt des Missionselements zu ermöglichen. Wird auf Basis der gegebenen Formation ein Bogenmanöver realisiert, so weist es für eine Rechtskurve die in Abbildung 4.2(c) dargestellte Form auf. Die Tangente am Startpunkt eines jeden Bogenelements beschreibt den Sollkurs des Fahrzeugverbands am Start des Manövers. Da alle Bogenelemente den gleichen Zentrumspunkt besitzen (siehe Unterabschnitt 3.4.2), wird die Formationstreue über den Winkel beschrieben, der für alle Elemente identisch sein muss. Im Gegensatz zum Punktmanöver zeigt Abbildung 4.2(c) lediglich einen beispielhaften Bogenverlauf, da sich durch eine Verlagerung des Zentrumspunktes der Krümmungswert der Bogenelemente und die Drehrichtung variabel gestalten lassen.

Neben dem Beachten der Ausrichtung und Formation des Fahrzeugverbands ist es notwendig, aufeinanderfolgende Missionselemente nahtlos aneinander zu fügen. Unde-

finierte Lücken zwischen dem Ende eines Missionselements und dem Beginn des Folgelements können bei verschiedenen Fahrzeugen zu ungeplanten Missionsverläufen und somit zu einer Kollisionsgefahr mit anderen Fahrzeugen des Verbands führen. Um dies zu vermeiden, muss für jedes Fahrzeug der Endpunkt eines Manövers dem Startpunkt des Folgemanövers entsprechen. In Abbildung 4.3 ist dies grafisch verdeutlicht.

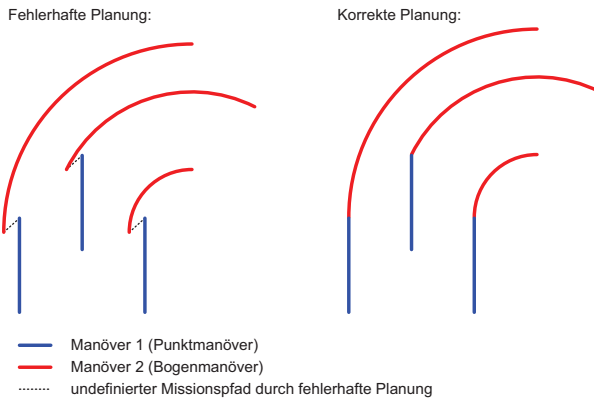


Abbildung 4.3: Pfadplanung aufeinanderfolgender Manöver

Die Gefahr undefinierter Missionspfade, wie in Abbildung 4.3 dargestellt, ergibt sich durch eine fehlende Parametrisierung. Die Fahrzeuge sind somit in der Lage, nach eigenem Ermessen den Startpunkt des Folgemanövers anzufahren. Da das vorgestellte Planungskonzept für verschiedene Fahrzeugtypen ausgelegt ist, deren Kontrollalgorithmen in den meisten Fällen unbekannt und verschieden sind, können Gefahrensituationen nicht ausgeschlossen werden. Die Reaktion der Fahrzeuge ist dabei vor allem von der Länge des undefinierten Missionspfads abhängig. Während sich Abweichungen von unter einem halben Meter in den meisten Fällen innerhalb des Toleranzbereichs zum Anfahren einer Position bewegen, können größere Abweichungen komplette Pfadplanungen auslösen. Des Weiteren sind die Toleranzbereiche vom Fahrzeugtyp und -betreiber abhängig. Aus diesem Grund ist eine exakte Planung der einzelnen Fahrzeugpfade notwendig.

4.1.3 Beachten der Fahrzeugspezifikationen

Um ungeeignete Fahrzeugkonstellationen oder Überschreitungen der Fahrzeugfähigkeiten vorab zu vermeiden, ist es notwendig, fahrzeugspezifische Daten mit in die Planung einzubeziehen. Der Datensatz eines Fahrzeugs muss für die vorgestellte teamorientierte Missionsplanung folgende Informationen enthalten:

- Fahrzeugidentifikationsnummer
- Fahrzeugtyp
- minimale Geschwindigkeit unter Wasser
- maximale Geschwindigkeit unter Wasser
- minimaler Wenderadius unter Wasser
- minimale Geschwindigkeit an Wasseroberfläche
- maximale Geschwindigkeit an Wasseroberfläche
- minimaler Wenderadius an Wasseroberfläche
- maximale Tauchtiefe

Auf Basis der genannten Punkte können die notwendigen Grenzen für Geschwindigkeit, Tauchtiefe und Wenderadien ermittelt und innerhalb der Planung verwendet werden. Da die Fahrzeugdatensätze neben der Planung auch im Teammanagement (Kapitel 5) sowie in der Fahrzeugsimulation (Unterabschnitt 6.2.1) Verwendung finden, sind diese in einer definierten XML-basierten Struktur abzulegen. Somit ist eine gute Les- und Editierbarkeit gewährleistet. Der Aufbau eines Fahrzeugdatensatzes ist in Anhang C (S. 173) beschrieben.

4.2 Softwaregestützte Missionsplanung

Um Fahrzeugmissionen ohne erweiterte Vorkenntnisse der Missionssprache oder der Fahrzeugparameter erstellen zu können, wurde während dieser Arbeit in C++ und Qt¹ ein intuitiv bedienbares Planungstool für Teammissionen entwickelt. Mit einer grafischen Benutzeroberfläche wird dem Nutzer nicht nur das Planen komplexer Missionen ermöglicht, sondern zusätzlich eine automatisierte Prüfung der Missionsparameter und -elemente zur Verfügung gestellt.

4.2.1 Aufbau der Planungssoftware

Die entwickelte Planungsoberfläche besitzt einen modularen Aufbau, dessen Grundstruktur in Abbildung 4.4 dargestellt ist.

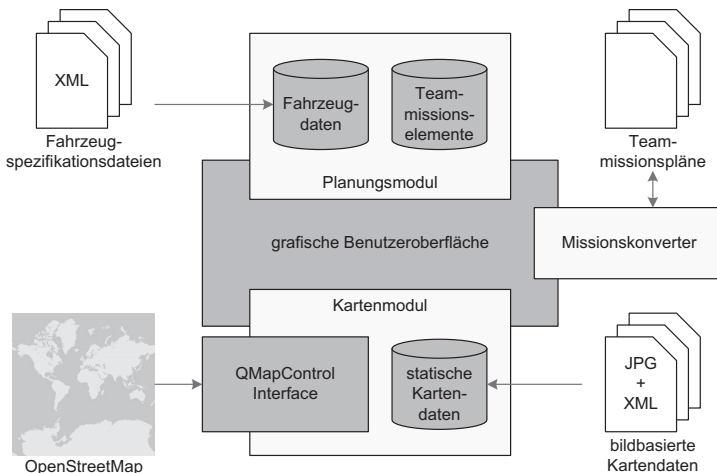


Abbildung 4.4: Grundstruktur der Planungsoberfläche

¹Softwarebibliothek für grafische Oberflächen und Bildverarbeitung, <http://qt.nokia.com/>

Den Ausgangspunkt für die flexible Planung bildet die Softwarekomponente des Planungsmoduls. Es beinhaltet einen Pool aus Teammissionselementen (siehe Abschnitt 4.1) in einer programmeigenen Struktur. Diese ist unabhängig von der verwendeten Missionssprache und optimiert zur grafischen Darstellung sowie Konfiguration der verschiedenen Elemente. Abbildung 4.5 illustriert den Grundaufbau der genannten Struktur am Beispiel eines mäanderförmigen Manövers.

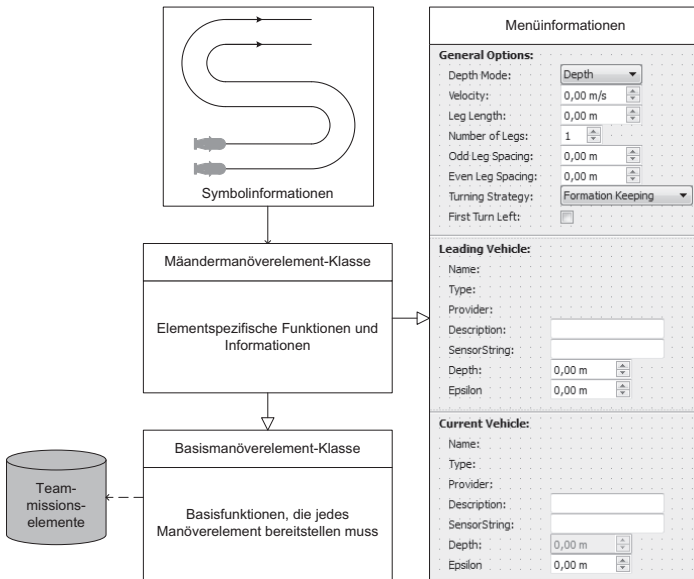


Abbildung 4.5: Grundaufbau eines Teammissionselements innerhalb des Planungsmoduls

Wie Abbildung 4.5 zeigt, besteht jedes Tamelement aus vier Grundbausteinen, die eine Integration und Darstellung innerhalb der grafischen Oberfläche ermöglichen. Um eine Verwaltung der Missionselemente zu vereinfachen, nutzen alle Elemente eine *Basismanöverelement-Klasse*, die den minimalen Funktionsumfang eines Missionselements vorgibt. Die spezifische Elementklasse, in Abbildung 4.5 durch

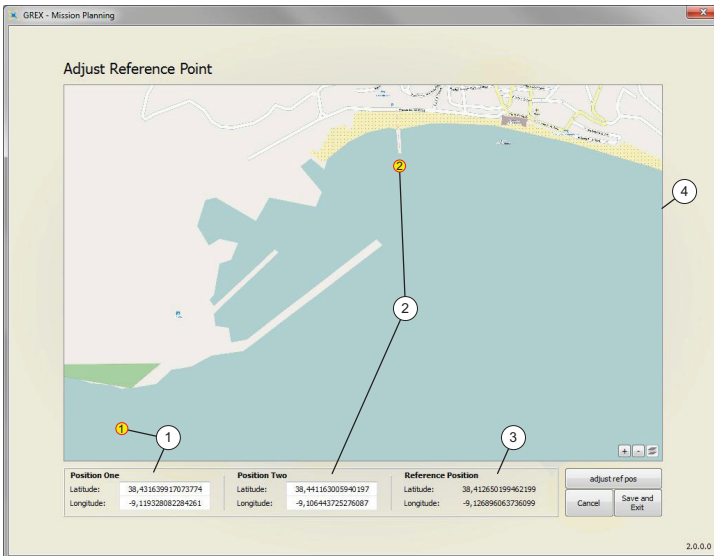
Mäandermanöverelement-Klasse dargestellt, ist von der Basisklasse abgeleitet. Für die Darstellung elementspezifischer Konfigurationsmenüs und Missionsobjekte enthält die Elementklasse zusätzlich spezifische Menü- sowie Symbolinformationen. Weiterhin befindet sich innerhalb der jeweiligen Elementklasse die grundlegende Algorithmik, die auf Basis der XML-basierten fahrzeugspezifischen Konfigurationsdateien eine Prüfung der Missionsparameter ermöglicht. Mit den im Unterabschnitt 4.1.3 beschriebenen Informationen können ungeeignete Fahrzeugzusammenstellungen, zu kleine Bogenradien oder überhöhte Manövergeschwindigkeiten automatisch unterbunden werden.

Das in Abbildung 4.4 dargestellte Kartenmodul bildet die zweite komplexe Softwarekomponente des Planungstools. Es ermöglicht das Einbinden von externem Kartenmaterial und somit eine ortsbezogene Planung. Für größtmögliche Flexibilität während der Planungsphase wurde die Softwarebibliothek QMapControl [Win08] in das Kartenmodul eingebettet. Sie ermöglicht bei bestehender Internetanbindung einen Zugriff auf die freie Weltkarte OpenStreetMap [OSM06]. Auf der anderen Seite kann der Nutzer eigene, auf Bilddaten basierende, Kartendaten einspielen und für die Planung nutzen. Abbildung 4.6 zeigt das angewandte Prinzip zum Einbinden nutzerdefinierter Kartendaten.



Abbildung 4.6: Konzept zum Einbinden von bildbasierten Kartendaten, Quelle Kartenausschnitt: ©OpenStreetMap und Mitwirkende, CC-BY-SA [OSM06]

Die Verwendung nutzerspezifischer Kartendaten erfordert, wie in Abbildung 4.6 dargestellt, neben der eigentlichen Bilddatei, einen XML-basierten Informationsträger, der die Georeferenzierung des gewünschten Bildausschnitts ermöglicht. Die entwickelte Software bietet dahingehend die Möglichkeit, die notwendigen Informationen durch die Angabe einer Bilddatei sowie zwei geodätischer Stützstellen automatisiert zu erzeugen. Abbildung 4.7 zeigt das zugehörige Funktionsmenü.



- ① Angabe der ersten bekannten geodätischen Koordinate
- ② Angabe der zweiten bekannten geodätischen Koordinate
- ③ berechnete Referenzkoordinate für die geladene Bilddatei
- ④ Anzeigefenster zum Verschieben, Vergrößern und Verkleinern des Kartenausschnitts

Abbildung 4.7: Nutzermenü zum Konfigurieren individueller Kartenausschnitte auf Basis bekannter geodätischer Stützstellen, Quelle Kartenausschnitt: ©OpenStreetMap und Mitwirkende, CC-BY-SA [OSM06]

Somit ist die Planung unabhängig von einer Internetanbindung und kann innerhalb von Gebäuden oder unbekanntem, durch die OpenStreetMap nicht abgedeckten, Ge-



Koordinatentransformation geschieht automatisch im Hintergrund. Der Nutzer kann jederzeit zwischen den genannten Koordinatensystemen wechseln.

4.2.2 Ablauf der Missionsplanung

Um die Komplexität der Missionsplanung so gering wie möglich zu halten, nutzt die vorgestellte Planungssoftware ein menügeführtes Planungssystem. Dem Nutzer werden somit Schritt für Schritt lediglich die Informationen und Dialoge präsentiert, die für die jeweilige Aufgabe notwendig sind. Abbildung 4.9 zeigt diesbezüglich einen vereinfachten Ablaufplan.

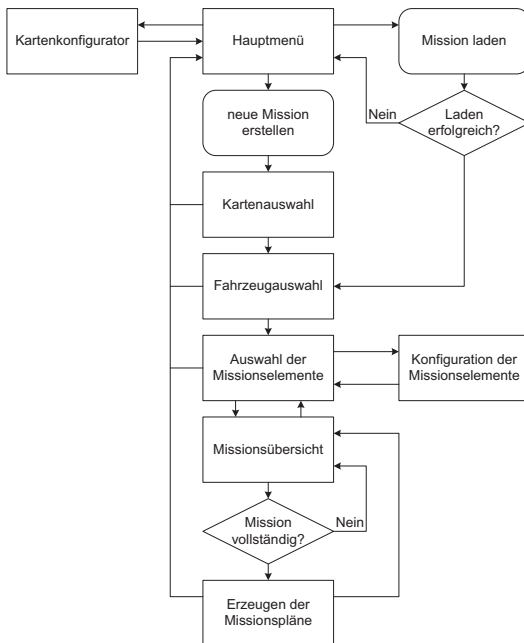


Abbildung 4.9: Vereinfachter Ablaufplan der softwaregestützten Missionsplanung

Da aus Gründen der Übersichtlichkeit in diesem Abschnitt nicht alle Nutzermenüs vorgestellt werden können, findet sich im Anhang B eine Übersicht aller während der Planungsphase präsentierten Dialoge.

Zentraler Ausgangspunkt der Missionsplanung ist das *Hauptmenü*, von dem aus eine neue Mission erstellt werden kann. Wird diese Option gewählt, gelangt der Nutzer zur Auswahl der Kartendaten sowie zur Auswahl der Fahrzeuge, welche an der jeweiligen Mission teilnehmen sollen. Nachdem die gewünschten Daten durch die Software geladen wurden, beginnt der eigentliche Prozess der Missionsplanung über die Auswahl der Missionselemente sowie deren Konfiguration. Abbildung 4.10 stellt das entsprechende Nutzermenü dar.

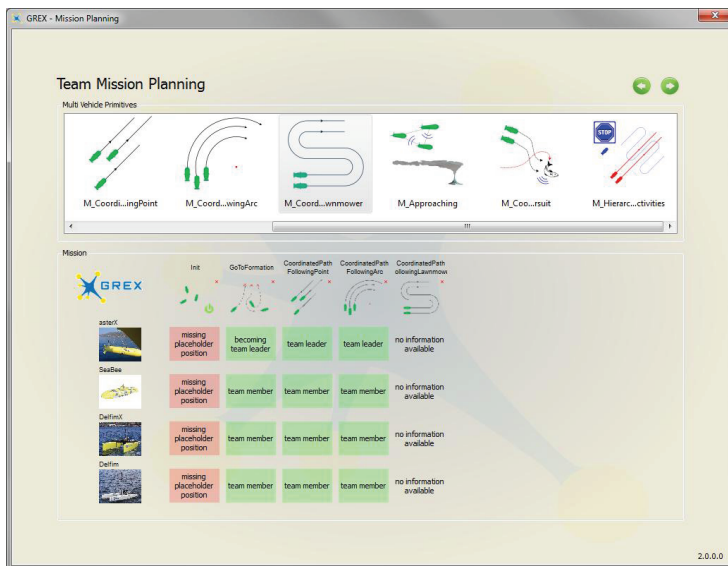


Abbildung 4.10: Nutzermenü zur elementbasierten Planung einer Mission

Im oberen Teil des in Abbildung 4.10 präsentierten Nutzermenüs finden sich alle verfügbaren Missionselemente. Diese sind innerhalb einer Liste mit einem Symbol sowie

einem Namen gekennzeichnet und können über einen Doppelklick an die bestehende Mission angehängt werden. Unzulässige Konstellationen werden dabei automatisch unterbunden und der Nutzer entsprechend informiert. Im unteren Teil des dargestellten Menüs finden sich die bereits eingefügten Elemente mit Basisinformationen, welche den links angezeigten Fahrzeugen zugeordnet sind. Diese sind zusätzlich farblich (rot – fehlende Elementkonfiguration, grün – fertig konfiguriert, nicht farblich abgehoben – unkonfiguriert) unterlegt, um dem Nutzer einen schnellen aber umfassenden Überblick zu geben. Um die Konfiguration eines Missionselements zu starten, muss lediglich das jeweilige Symbol in der unteren Fensterhälfte angewählt werden. Basierend auf dem in Abbildung 4.10 dargestellten Beispiel zeigt Abbildung 4.11 das Konfigurationsmenü des mäanderförmigen Manövers.

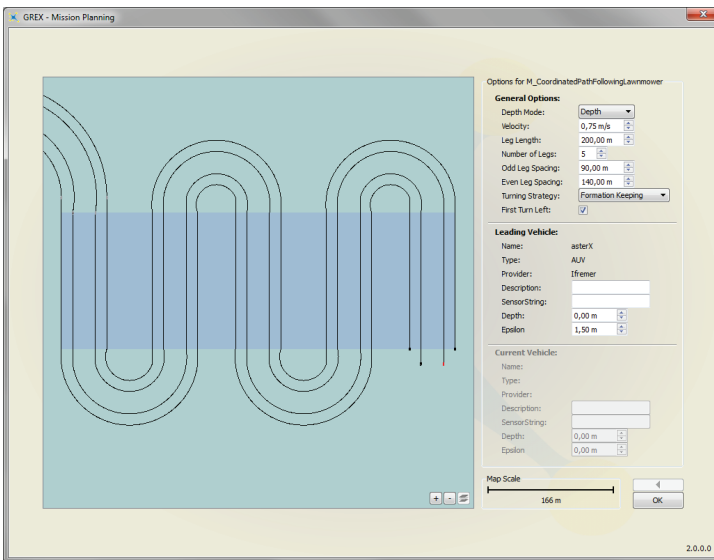


Abbildung 4.11: Nutzermenü zum Konfigurieren eines Tamelements

Im linken Teil des in Abbildung 4.11 dargestellten Menüs findet sich die Kartenansicht sowie alle bisher konfigurierten Missionselemente. Dieser Ausschnitt kann frei

bewegt, vergrößert und verkleinert werden, um dem Nutzer eine optimale Übersicht zu erlauben. Auf der rechten Seite des Menüs findet sich das elementspezifische Konfigurationsfenster, welches wie in Unterabschnitt 4.2.1 beschrieben, ein Teil der hinterlegten Elementstruktur ist. Im gezeigten Beispiel enthält es alle Einstellungsmöglichkeiten, die für die Konfiguration des mäanderförmigen Manövers erforderlich sind. Das Konzept ist angelehnt an die in [GSO07] präsentierte Planung von Missionselementen und enthält lediglich die notwendigen Elementparameter. Basiseinstellungen sowie fehlende Elementgrößen werden automatisiert berechnet. Des Weiteren werden Änderungen pfadrelevanter Parameter (Richtung, Länge, etc.) umgehend in der Kartenansicht dargestellt. Neben den globalen Missionsparametern können zusätzlich fahrzeugspezifische Angaben über die Auswahl des jeweiligen Fahrzeugs vorgenommen werden. Abbildung 4.12 verdeutlicht dieses Prinzip.

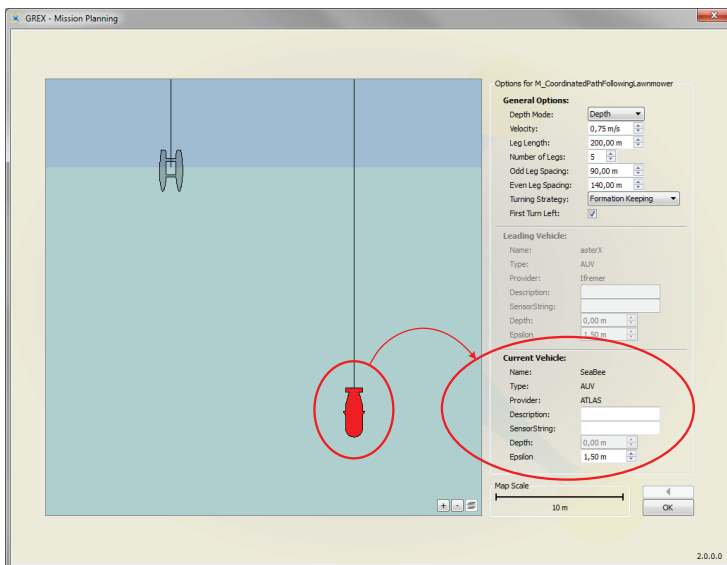


Abbildung 4.12: Nutzermenü zum Konfigurieren eines Teamelements mit aktiven Einzelfahrzeugooptionen

Der dargestellte Kartenausschnitt in Abbildung 4.12 zeigt eine Vergrößerung des in Abbildung 4.11 präsentierten Missionsbereichs. Weiterhin sind das selektierte Fahrzeug und das entsprechende Optionsfenster in der Abbildung markiert. Da die Formation des Verbands definiert ist, können lediglich Angaben zur Beschreibung sowie zu Sensorbefehlen und einem fahrzeugspezifischen Schwellwert gemacht werden. Obwohl das markierte Fahrzeug ein Unterwasserfahrzeug repräsentiert, kann die Tiefe in diesem Fall nicht verändert werden. Grund dafür ist die vorgegebene Formation in Verbindung mit Überwasserfahrzeugen innerhalb des Verbands. Eine Änderung des Tiefenwerts beschreibt in diesem Fall eine Änderung der Formation. Das Beispiel zeigt einen der automatisierten Kontrollmechanismen für eine fehlerfreie Missionsplanung. Nach der Konfiguration der Missionselemente kann über die *Missionsübersicht* der bisher realisierte Missionsplan begutachtet werden. Sind weitere Änderungen notwendig, so können diese über das vorherige Nutzermenü eingebracht werden. Ist der Missionsplan vollständig und korrekt geplant, kann der Nutzer das Erzeugen der Missionspläne einleiten. In diesem Fall ist die Planung abgeschlossen.

4.3 Formationstreue Hindernisvermeidung bekannter Objekte

Neben der während dieser Arbeit realisierten softwaregestützten Missionsplanung für Fahrzeugverbände wurde in [Alr10], unter Mitarbeit/ Betreuung des Autors, ein grafenbasiertes Verfahren zur formationstreuen Hindernisvermeidung bekannter Objekte entwickelt und in MATLAB® implementiert. Es ermöglicht in einem separaten Planungsschritt die Berechnung der notwendigen Ersatzmanöver sowie eine Überprüfung aller Fahrzeugpfade auf Kollisionsfreiheit. Um dies auf Basis des vorgestellten Missionskonzepts zu realisieren, muss der synchrone Pfadaufbau (siehe Unterabschnitt 4.1.2) innerhalb einer Teammission beachtet werden. Nur auf diesem Weg kann eine Formationserhaltung auf dem in Unterabschnitt 5.2.2 beschriebenen Verfahren stattfinden.

4.3.1 Hindernisrepräsentation im Kontext formationsorientierter Kollisionsvermeidung

Um Hindernisse in einer mathematisch beschreibbaren Form darstellen zu können, werden diese durch Ellipsen repräsentiert. Diese Methode wird in [Eic04] vorgestellt und für die Hindernisvermeidung auf Basis eines einzelnen autonomen Fahrzeugs in einer zweidimensionalen Umgebung angewandt. Da sich Ellipsen durch einen Zentrumsunkt x_c, y_c , die Hauptachse a , die Nebenachse b und einen Rotationswinkel α beschreiben lassen, eignen sie sich sehr gut zur Repräsentation von Objekten verschiedener Größe, Form und Ausdehnung. Für eine vereinfachte Kollisionserkennung werden Fahrzeuge in [Eic04] als punktförmige Körper modelliert, wodurch eine Vergrößerung der Hindernisse um die Größe des Fahrzeugs sowie einen Sicherheitsabstand erforderlich ist. Abbildung 4.13 zeigt die genannte Approximation.

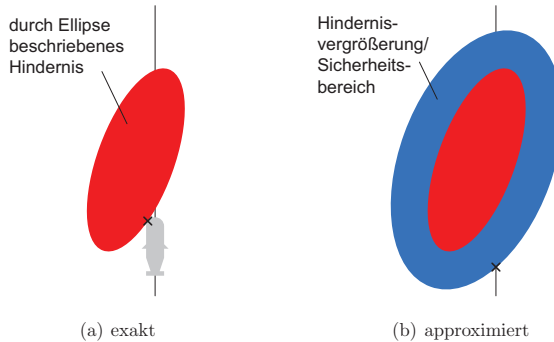


Abbildung 4.13: Approximation der Kollisionserkennung

Für die Kollisionsvermeidung eines Fahrzeugverbands muss das vorgestellte Prinzip erweitert werden. Auf Basis einer gegebenen Formation wird der komplette Fahrzeugverband durch ein virtuelles Fahrzeug, welches mittig am Ende der Formation platziert wird, approximiert. Die in [GSJO09] vorgestellte Methode ist in Abbildung 4.14 grafisch dargestellt.

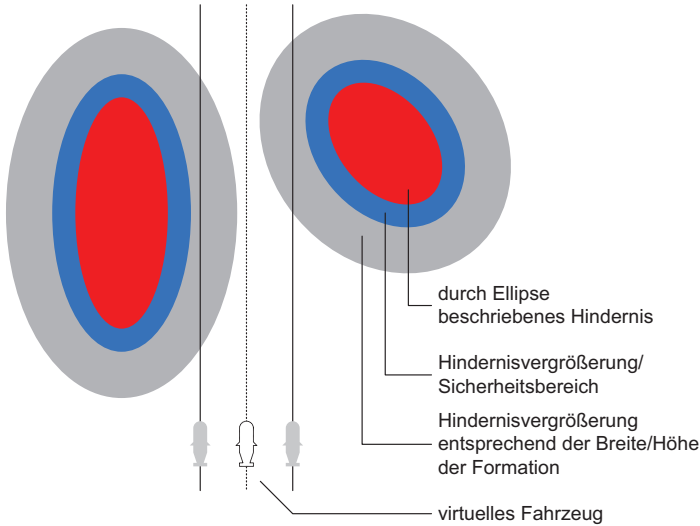


Abbildung 4.14: Prinzip der Kollisionsprüfung mit einem Fahrzeugverband

Wie Abbildung 4.14 zeigt, müssen vorhandene Hindernisse nicht nur um den erwähnten Sicherheitsabstand, sondern durch die Approximation des Fahrzeugverbands um die Hälfte der Breite oder Länge der Formation vergrößert werden. Ausschlaggebend ist jeweils der größere der beiden Werte. Findet sich für das virtuelle Fahrzeug kein Kollisionspunkt mit einem Hindernis, so ist der Pfad für alle Fahrzeuge des Verbands kollisionsfrei befahrbar. Weiterhin ermöglicht die vorgestellte Approximation eines Fahrzeugverbands die Einhaltung der synchronen Pfadplanung, da alle Fahrzeugpfade entsprechend des über die graphenbasierte Suche gefundenen Ausweichmanövers des virtuellen Führungsfahrzeugs bestimmt werden.

Wie in [GAS⁺10] gezeigt, ist die Berechnung der notwendigen Ellipsenvergrößerung, im weiteren Verlauf mit c bezeichnet, kein triviales Problem. Der erforderliche Abstand zu der das Hindernis umspannenden Ellipse kann, bei einem Sicherheitsabstand d_s , einer Fahrzeugbreite w_v , einer Formationsbreite w_f und einer Formationslänge l_f , wie folgt

beschrieben werden:

$$c = d_s + w_v + \max(w_f, l_f). \quad (4.1)$$

Vergrößert man die Hauptachse a sowie die Nebenachse b einer Ellipse E_1 um den berechneten Wert c , so besitzt die daraus entstehende Ellipse E' lediglich an den Scheitelpunkten den minimalen Abstand zu E_1 . An allen anderen Punkten der Ellipse E' ist der Abstand zu E_1 kleiner als c . Abbildung 4.15 illustriert dies grafisch.

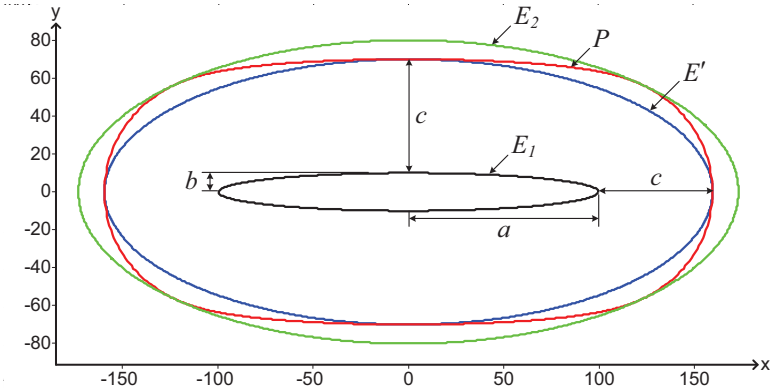


Abbildung 4.15: Problem der formationsorientierten Ellipsenvergrößerung

Auf dieser Basis kann nicht garantiert werden, dass die äußeren Fahrzeuge eines Verbands das durch E_1 repräsentierte Hindernis kollisionsfrei passieren können. Die Kurve, welche die minimalen Voraussetzungen erfüllt und somit an jeder Stelle zu E_1 mindestens den Abstand c aufweist, kann durch einen Kreis mit dem Durchmesser c erzeugt werden, der um E_1 gerollt wird. Die daraus entstehende Figur wird in Abbildung 4.15 durch P dargestellt und ist selbst keine Ellipse. Befindet sich die Ellipse E_1 , wie gezeigt, in der ersten Hauptlage³, so weist P für $0 \leq t \leq 2\pi$ die folgende Parameterdarstellung

³Ellipsenmittelpunkt befindet sich im Ursprung während die Hauptachse der Ellipse entlang der x-Achse des Koordinatensystems verläuft

auf:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a \cos t + c \cdot \frac{b \cos t}{\sqrt{b^2 \cos^2 t + a^2 \sin^2 t}} \\ b \sin t + c \cdot \frac{a \sin t}{\sqrt{b^2 \cos^2 t + a^2 \sin^2 t}} \end{pmatrix}. \quad (4.2)$$

Somit ist gezeigt, dass P die Parameterdarstellung einer Ellipse in erster Hauptlage für $0 \leq t \leq 2\pi$ mit

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a \cos t \\ b \sin t \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

nicht erfüllt. Um im weiteren Verlauf eine Repräsentation der Hindernisse durch Ellipsen zu erlauben, muss die Ellipse E_2 mit der Hauptachse A sowie der Nebenachse B gefunden werden, welche die Kurve P vollständig und flächenminimal umschließt. Das Prinzip ist in Abbildung 4.16 grafisch dargestellt.

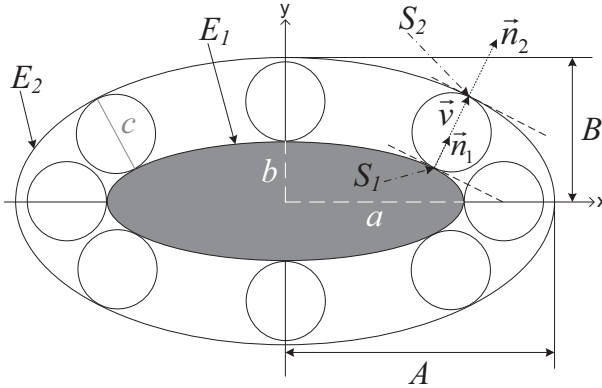


Abbildung 4.16: Ellipsenvergrößerung im Detail

Um die Berechnung für E_2 zu vereinfachen, wird angenommen, dass sich das Zentrum von E_1 im Koordinatenursprung befindet und die Hauptachse a entlang der x-Achse verläuft. Wie Abbildung 4.16 zeigt, berührt die gesuchte Ellipse E_2 die Kurve P an einem Punkt pro Quadrant. Der Punkt S_2 zeigt dies für den ersten Quadranten. An

diesen Stellen ist die Entfernung zwischen E_1 und E_2 bzw. zwischen den Punkten S_1 und S_2 minimal. Es ist festzustellen, dass die Normalen von E_1 in S_1 und E_2 in S_2 identisch sind. Des Weiteren entsprechen die Tangenten an diesen Punkten den Tangenten eines Kreises, welcher den Durchmesser c besitzt und die Ellipsen E_1 sowie E_2 an den Punkten S_1 und S_2 berührt. Aus diesem Grund liegen die Punkte S_1 und S_2 jeweils auf der Normalen des anderen Punktes, bezogen auf dessen Ellipse. Die beiden Normalen sind somit identisch. Dadurch ergibt sich im Weiteren, dass die Normalenvektoren \vec{n}_1 und \vec{n}_2 sowie der Vektor $\vec{\nu}$ parallel sind. Somit lassen sich folgende Beziehungen aufstellen:

$$\vec{n}_1 = \begin{pmatrix} \frac{x_1}{a^2} \\ \frac{y_1}{b^2} \end{pmatrix} = k \cdot \vec{n}_2 = k \cdot \begin{pmatrix} \frac{x_2}{A^2} \\ \frac{y_2}{B^2} \end{pmatrix} \Rightarrow k = \frac{A^2 x_1}{a^2 x_2} = \frac{B^2 y_1}{b^2 y_2} \quad (4.4)$$

$$\vec{\nu} = \begin{pmatrix} x_2 - x_1 \\ y_2 - y_1 \end{pmatrix} = q \cdot \vec{n}_1 \Rightarrow q = a^2 \left(\frac{x_2}{x_1} - 1 \right) = b^2 \left(\frac{y_2}{y_1} - 1 \right). \quad (4.5)$$

Dabei entspricht k dem Längenverhältnis der Normalenvektoren \vec{n}_1 und \vec{n}_2 . Der Wert q beschreibt das Längenverhältnis des Abstands zwischen S_1 und S_2 zum Vektor \vec{n}_1 . Über den in Gleichung 4.4 aufgestellten Zusammenhang lassen sich anschließend die Quotienten der Koordinaten in Gleichung 4.5 ersetzen und folgende Beziehung für q herleiten:

$$q = \frac{A^2}{k} - a^2 = \frac{B^2}{k} - b^2. \quad (4.6)$$

In den Mittelpunktgleichungen der Ellipsen E_1 und E_2

$$E_1 : \frac{x_1^2}{a^2} + \frac{y_1^2}{b^2} = 1 \quad E_2 : \frac{x_2^2}{A^2} + \frac{y_2^2}{B^2} = 1 \quad (4.7)$$

können nun x_2 und y_2 durch x_1 , y_1 und k gemäß Gleichung 4.4 ersetzt werden und ergeben

$$\begin{aligned} x_1^2 &= \frac{a^4 b^2}{A^2 b^2 - a^2 B^2} \left(k^2 - \frac{B^2}{b^2} \right) \\ y_1^2 &= \frac{a^4 b^2}{A^2 b^2 - a^2 B^2} \left(\frac{A^2}{a^2} - k^2 \right). \end{aligned} \quad (4.8)$$

Darüber hinaus kann über den Abstand c zwischen S_1 und S_2 folgender Zusammenhang aufgestellt werden:

$$c^2 = (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 \quad (4.9)$$

Anschließend können $(x_2 - x_1)$ und $(y_2 - y_1)$ aus der Gleichung 4.5 in Gleichung 4.9 eingesetzt werden und ergeben für c^2 folgenden Zusammenhang:

$$c^2 = q^2 \left(\frac{x_1^2}{a^4} + \frac{y_1^2}{b^4} \right). \quad (4.10)$$

In Gleichung 4.10 lassen sich q gemäß Gleichung 4.6 sowie x_1 und y_1 entsprechend Gleichung 4.8 ersetzen. Nach der Vereinfachung der daraus resultierenden Gleichung ergibt sich der gesuchte Zusammenhang, welcher die Beziehung zwischen den festen Parametern a , b , c und den gesuchten Größen A und B beschreibt:

$$c^2 = \frac{(A^2 b^2 - a^2 B^2)(B^2 - A^2 - b^2 + a^2)}{(b^2 - a^2)(B^2 - a^2)}. \quad (4.11)$$

Nutzt man Gleichung 4.11 als Nebenbedingung für ein Minimierungsverfahren (z. B. *fmincon* unter MATLAB®), ist es möglich die Fläche der Ellipse E_2

$$A_{E_2} = \pi \cdot A \cdot B \quad (4.12)$$

zu minimieren und die Parameter A und B zu bestimmen. Eine analytische Lösung zur Bestimmung der gesuchten flächenminimalen Ellipse E_2 ist in [Alr10] beschrieben. Da für eine Hindernisvermeidung im weiteren Verlauf ein graphenbasiertes Verfahren genutzt wird, ist es notwendig, die gefundene, das Hindernis flächenminimal umschließende Ellipse E_2 , zu diskretisieren und dadurch in eine Polygonform zu überführen. Die Polygonstützstellen werden dabei, wie in [Eic07] vorgestellt, auf Basis normierter Stützstellen um einen Einheitskreis bestimmt. Die Ellipse wird dabei in erster Hauptlage

betrachtet, wodurch lediglich die Polygonstützstellen innerhalb des ersten Quadranten berechnet werden müssen. Die Polygonpunkte der weiteren Quadranten ergeben sich anschließend durch einen entsprechenden Vorzeichenwechsel. Abbildung 4.17 verdeutlicht das angewandte Prinzip für die Verwendung von zwei Stützstellen pro Quadrant.

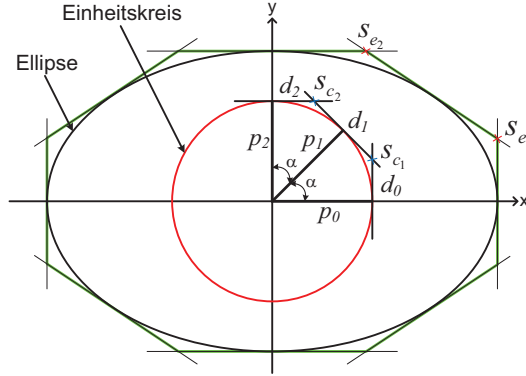


Abbildung 4.17: Prinzip der Ellipsendiskretisierung

Die Anzahl der notwendigen Stützstellen ist abhängig von den Mindestanforderungen des Fahrzeugverbands und wird in einem iterativen Prozess bestimmt. Dieser beginnt mit einer Stützstelle pro Quadrant. Erfüllt die resultierende Polygonform sowohl die Anforderung an die minimale Streckenlänge zwischen zwei Polygonpunkten als auch an den minimalen Wenderadius, so wird die Anzahl der Stützstellen pro Quadrant schrittweise inkrementiert. Für die Berechnung der Stützstellen s_{c_n} wird die Geradengleichung von d_n

$$d_n : y = \frac{-1}{\tan(n \cdot \alpha)} \cdot x + \frac{1}{\sin(n \cdot \alpha)} \text{ für } 1 \leq n < m \quad (4.13)$$

genutzt, wobei die zu den Hauptachsen orthogonalen Geraden mit $d_0 : x = 1$ und $d_m : y = 1$ bestimmt sind. Der Punkt $s_{c_{n+1}}$ des resultierenden Polygons kann somit

über den Schnittpunkt der Geraden d_n sowie der Geraden d_{n+1} unter Verwendung des folgenden Gleichungssystems berechnet werden:

$$\begin{aligned} x_{c_{n+1}} &= \cos(n \cdot \alpha) - \sin(n \cdot \alpha) \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \\ y_{c_{n+1}} &= \sin(n \cdot \alpha) + \cos(n \cdot \alpha) \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right). \end{aligned} \quad (4.14)$$

Auf Basis der ermittelten Punkte, welche sich gleichmäßig um den in Abbildung 4.17 dargestellten Einheitskreis verteilen, lassen sich in Abhängigkeit des Verhältnisses zu den Hauptachsen a und b der Ellipse, die gesuchten Punkte $s_{e_1 \dots d_n}$ bestimmen. Das Gleichungssystem 4.15 zeigt den genannten Zusammenhang:

$$\begin{aligned} x_{e_{n+1}} &= a \cdot x_{c_{n+1}} \\ y_{e_{n+1}} &= b \cdot y_{c_{n+1}}. \end{aligned} \quad (4.15)$$

Erfüllt die Polygonform einer Ellipse bereits bei einem Stützpunkt pro Quadrant nicht die genannten Mindestanforderungen, so wird diese schrittweise um den definierten Sicherheitsabstand vergrößert, bis eine durch den Verband befahrbare Polygonform gefunden ist.

4.3.2 Graphenbasierte Pfadsuche zur formationstremen Hindernisvermeidung

Nachdem die Ellipsen aller Hindernisse durch die im Unterabschnitt 4.3.1 beschriebene Methodik diskretisiert sind, ist im zweiten Schritt die Suche nach einem geeigneten Pfad zur Hindernisvermeidung zu realisieren. Daher werden in einem anschließenden Prozess alle bei der Diskretisierung gefundenen Punkte der Ellipsen ν_i sowie der Start- und Zielpunkt (s, t) als Knoten eines Graphen genutzt. Knoten innerhalb von Ellipsen, welche durch die Überlappung von Ellipsen entstehen können, werden dabei nicht

beachtet und entfernt. Alle verbleibenden Knoten werden über Kanten miteinander verbunden, wobei die Entfernung zwischen zwei Knoten das Gewicht einer Kante bestimmt. Kanten innerhalb von Ellipsen erhalten einen definierten Maximalwert, um sie als ungültig zu markieren.

Der auf diesem Weg realisierte Graph wird anschließend entsprechend den vorliegenden Fahrzeuspezifikationen modifiziert und bildet somit die Grundlage für einen Dijkstra-Algorithmus, welcher die kürzeste und durch den Verband befahrbare Verbindung zwischen einem Startpunkt s und einem Zielpunkt t ermittelt. Ohne Modifikation wird auf Basis des vorliegenden Graphen zwar der kürzeste Weg zwischen Start- und Zielpunkt gefunden, die Einschränkungen und Spezifikationen der Fahrzeuge des Verbands (repräsentiert durch das virtuelle Fahrzeug) bleiben jedoch unbeachtet. Dadurch können, bei ungünstiger Hinderniskonstellation, die Pfade einzelner Teammitglieder unpassierbar werden. Abbildung 4.18(b) zeigt beispielhaft das Ergebnis eines derartigen Sucherprozesses. Klar erkennbar ist der markierte und durch ein reales Fahrzeug nicht realisierbare Pfadabschnitt.

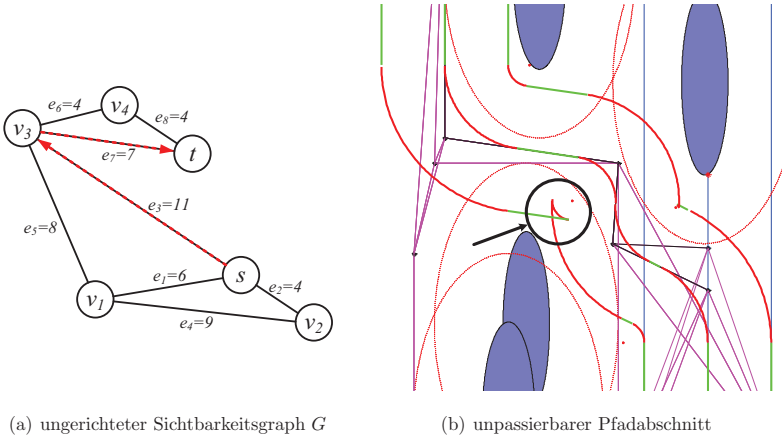


Abbildung 4.18: Prinzip und Probleme der Pfadsuche über ungerichteten Sichtbarkeitsgraphen

Abbildung 4.18(a) zeigt einen ungerichteten Graphen G mit zugehörigem Start- sowie Endpunkt und vier Knoten. Des Weiteren besitzen alle Kanten einen entsprechenden Kostenwert. Die daraus resultierende kürzeste Verbindung zwischen den Knoten s und t ist separat gekennzeichnet und besitzt am Knoten v_3 einen sehr spitzen Winkel. Somit ist diese Verbindung für den Verband nicht passierbar. Wird der gefundene Pfad zum Erzeugen der Missionspläne der einzelnen Teammitglieder auf Basis der festgelegten Formation und der Ausrichtung des virtuellen Fahrzeugs genutzt, entstehen Probleme wie sie die Abbildung 4.18(b) verdeutlicht. Die Probleme sind dem synchronen Planungskonzept geschuldet, welches zum Erzeugen gültiger Missionspläne beachtet werden muss. Aus diesem Grund ist es notwendig, den Graphen G entsprechend den Bedingungen der Missionsplanung zu modifizieren. Das angewandte Prinzip ist in Abbildung 4.19 dargestellt.

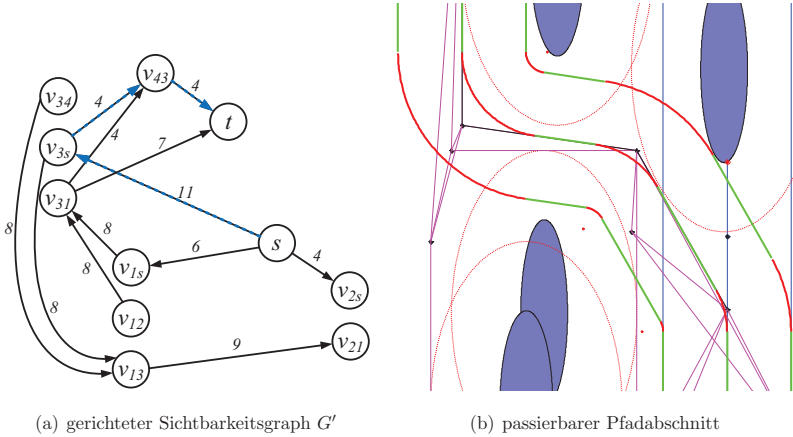


Abbildung 4.19: Pfadsuche über gerichteten Sichtbarkeitsgraphen

Der ungerichtete Graph G wird somit in einen gerichteten Graphen G' überführt, indem von jedem Knoten, außer dem Startknoten s und dem Zielknoten t , so viele Kopien erstellt werden, wie die Anzahl der zu ihm inzidenten Kanten. Jede Knotenkopie wird mit der Kante verbunden, aus der der reale Knoten betreten wurde. Ein Knoten v_{ij}

ist somit eine Kopie des Knotens ν_i , welche vom Knoten ν_j betreten wurde. Auf diese Weise wird die Herkunft einer Kante im Knoten gespeichert. Ausgehende Kanten eines Knotens werden abhängig von den eingehenden Kanten nur dann eingetragen, wenn die Minimalanforderungen an die Wenderadien und Streckenlängen aller Teammitglieder erfüllt sind. So entsteht ein gerichteter Graph G' , welcher nur gültige Pfade enthält, mit

$$V(G') = \{s, t\} \cup \{\nu^{e_i} \mid \nu \in V(G) \setminus \{s, t\}, e_i \in E(G), e_i \text{ inzident zu } \nu\} \quad (4.16)$$

und

$$E(G') = \{(\nu_h^{e_i}, \nu_k^{e_j}) \mid \nu_h, \nu_k \in V(G), e_j = (\nu_h, \nu_k) \in E(G), \nu_h \neq \nu_k, \text{ wurde } \nu_h \text{ durch } e_i \text{ betreten, darf es durch } e_j \text{ verlassen werden}\}. \quad (4.17)$$

Wendet man die Modifikation des Graphen auf das in Abbildung 4.18(a) gezeigte Problem an, erhält man die in Abbildung 4.19(b) dargestellte Lösung. Die resultierenden Missionspfade zur Hindernisvermeidung können von allen Fahrzeugen problemlos befahren werden.

Das folgende Beispiel verdeutlicht das Prinzip der vorgestellten Methode. Den Ausgangspunkt bildet, wie in Abbildung 4.20(a) gezeigt, die Kollisionspunktberechnung der Missionspfade aller Fahrzeuge mit den die Hindernisse repräsentierenden Ellipsen. Existieren Kollisionspunkte, werden die Ellipsen der Hindernisse vergrößert und diskretisiert. Dieser Schritt ist in Abbildung 4.20(b) dargestellt. Anschließend wird der modifizierte Graph G' gebildet, dessen Resultat die Abbildung 4.21(a) zeigt. Die gefundene kürzeste und befahrbare Verbindung zwischen dem Start- und dem Zielpunkt, weist jedoch beim Übergang vom kollisionsfreien Ersatzmanöver zum Manöver des Originalplans einen durch den Verband nicht realisierbaren Pfadabschnitt auf. Aus diesem Grund wird der Zielpunkt entlang der geplanten Trajektorie verschoben, bis ein durch den Fahrzeugverband befahrbares Manöver realisierbar ist (siehe Abbildung 4.21(b)).

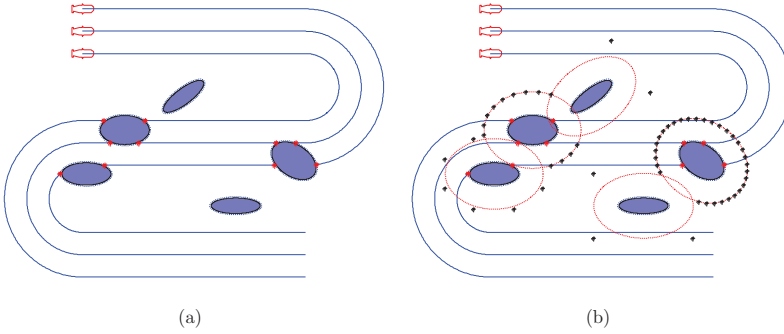


Abbildung 4.20: Bestimmung der Kollisionspunkte des Originalmissionsplans mit den Hindernisellipsen (a) sowie Vergrößerung und Diskretisierung der Hindernisellipsen (b)

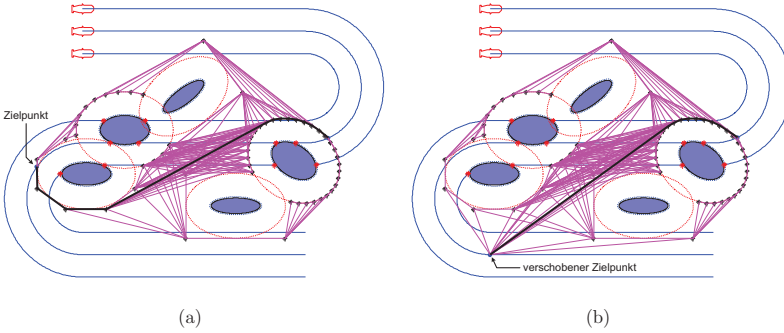


Abbildung 4.21: Erzeugen des modifizierten Graphen G' und Suche nach dem kürzesten Weg zwischen dem Start- und Zielpunkt (a) sowie die Anpassung des Zielpunktes um die Fahrzeuganforderungen zu erfüllen (b)

Auf Basis des gefundenen Ausweichmanövers für das virtuelle Fahrzeug (siehe Abbildung 4.22(a)), können die Missionspfade aller Fahrzeuge des Verbands berechnet werden. Diese sind in Abbildung 4.22(b) dargestellt.

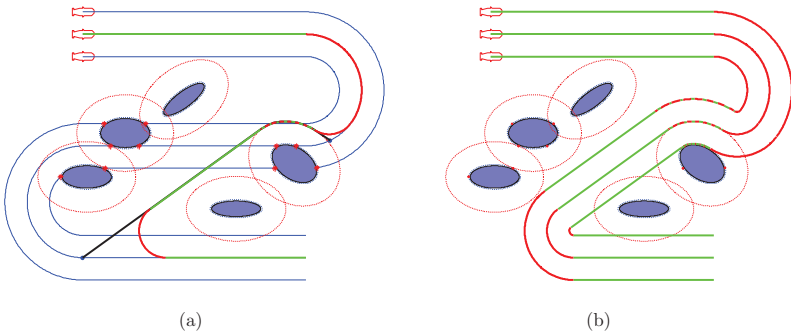


Abbildung 4.22: *Missionsplan des virtuellen Fahrzeugs (a) sowie die daraus resultierenden Missionspäne zur formationsorientierten Hindernisvermeidung (b)*

Im gezeigten Beispiel ist der Missionspfad des virtuellen Fahrzeugs, welcher in Abbildung 4.22(a) dargestellt ist, identisch mit dem des mittleren Fahrzeugs der Formation (siehe Abbildung 4.22(b)).

4.4 Zusammenfassung

Der erste Teil dieses Kapitels beschreibt die Realisierung eines Planungskonzepts sowie einer neuartigen softwaregestützten Missionsplanung für Verbände autonomer maritimer Fahrzeuge auf Basis der in Kapitel 3 vorgestellten Missionssprache. Die realisierte Software ermöglicht die Planung einer Mission ohne erweiterte Vorkenntnisse, da die Komplexität der Missionssprache dem Nutzer verborgen bleibt. Während der Zusammenstellung eines Fahrzeugverbands werden zusätzlich automatisch alle für eine Planung relevanten Fahrzeuginformationen eingelesen und für die Berechnung der verschiedenen Manöver genutzt. Fehlerhafte oder durch ein Fahrzeug nicht befahrbare Pfade werden dadurch vermieden.

Die Entwicklung einer formationstreuenden Hindernisvermeidung bekannter Objekte beschreibt eine Erweiterung des vorgestellten Planungssystems. Das graphenbasierte Verfahren bietet neuartige Ansätze, um das Problem der Hindernisvermeidung eines Fahrzeugverbands zu lösen und ermöglicht eine automatisierte Prüfung bestehender Missionspläne auf Kollisionsfreiheit bzw. deren Modifikation.

Das in diesem Kapitel vorgestellte Konzept bildet die Voraussetzung für eine effiziente fehlerfreie Missionsplanung und somit für das in Kapitel 5 beschriebene Teammanagement.

5 Managementkonzept für Verbände autonomer Fahrzeuge

Auf Basis der in den Kapiteln 3 und 4 vorgestellten teamorientierten Missionssprache sowie der Planung entsprechender Teammissionen behandelt dieses Kapitel die Realisierung eines zweistufigen Managementkonzepts für Verbände unterschiedlicher autonomer maritimer Fahrzeuge. Das vorgestellte Beobachtungs- und Umplanungssystem ermöglicht es einzelautonomen Systemen innerhalb eines Teams zu agieren und komplexe Missionen durchzuführen. Das entwickelte Konzept wird am Beispiel der GREX-Systemlösung erläutert, welche in Abbildung 5.1 dargestellt ist.

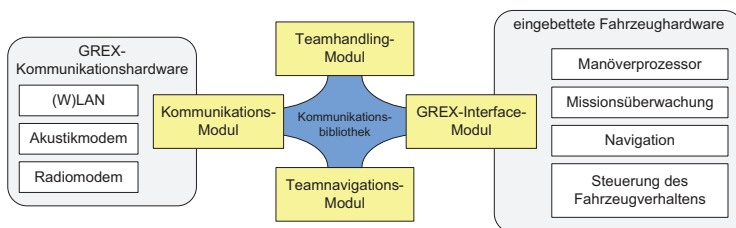


Abbildung 5.1: GREX-Systemlösung innerhalb eines Fahrzeugs

Die Arbeitsteilung verschiedener Softwaremodule für Kommunikation und Navigation sowie dem in diesem Kapitel betrachteten Managementsystem des *Teamhandling-Moduls* ermöglicht die Kooperation unterschiedlicher maritimer Fahrzeuge.

5.1 Aufbau des Teammanagements

Die Grundlage für die Realisierung des Teammanagements bildet die im Kapitel 3 vorgestellte Missionssprache. Diese berücksichtigt bereits die Restriktionen der Fahrzeughersteller und definiert somit den Handlungsspielraum für das vorgestellte Managementkonzept. Eingriffe in den Ablauf einer Mission sind daher auf die Anpassung der Geschwindigkeit, den Sprung zu bestehenden Manövern und die Umplanung spezieller Manöver beschränkt, was direkte Auswirkungen auf den Aufbau des Teammanagements hat. Das aus diesen Vorgaben abgeleitete Konzept wird in [GSO08] sowie [SGGO09] beschrieben und ist in Abbildung 5.2 dargestellt, welche die Unterteilung des Managementsystems in Missionsüberwachung und Missionsumplanung zeigt.

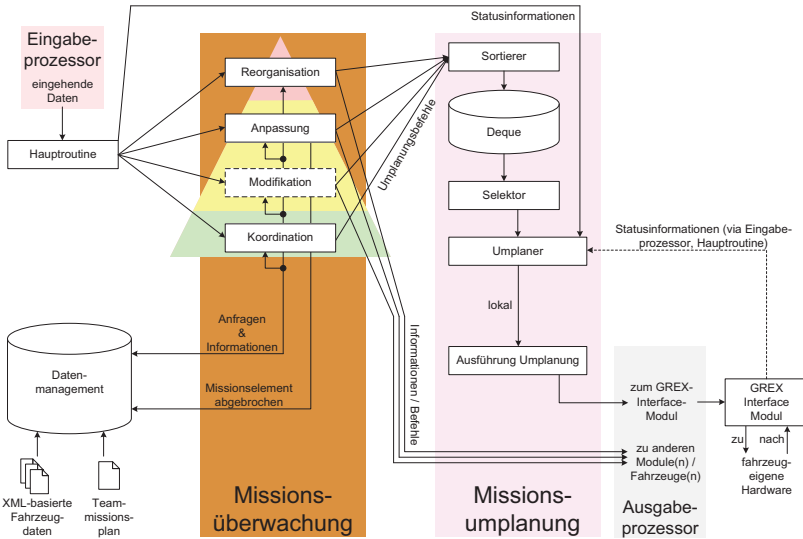


Abbildung 5.2: Hauptbestandteile des Teammanagementkonzepts

Somit wird nicht nur eine logische Trennung des strategischen vom ausführenden Level erreicht, es werden gleichzeitig die zugelassenen Einflussgrößen modular erfasst.

Eine ausführliche Beschreibung des Aufbaus und der Funktionsweise der dargestellten Hauptbestandteile findet sich in den Unterabschnitten 5.1.1 bis 5.1.3. Abbildung 5.2 zeigt weiterhin den grundlegenden Datenfluss innerhalb des Teammanagements. Als Kommunikationsschnittstellen zu anderen verarbeitenden Softwaremodulen des eigenen Fahrzeugs oder anderer Fahrzeuge dienen ein *Eingabeprozessor* zum Empfangen von Daten, sowie ein *Ausgabeprozessor* zum Versenden von Daten. Die *Hauptroutine* übernimmt, neben dem Verteilen eingehender Informationen an die verarbeitenden Prozesse, die Verwaltung der Systemprozesse des Managementsystems. Abbildung 5.3 zeigt den realisierten Prozessablauf der *Hauptroutine*.

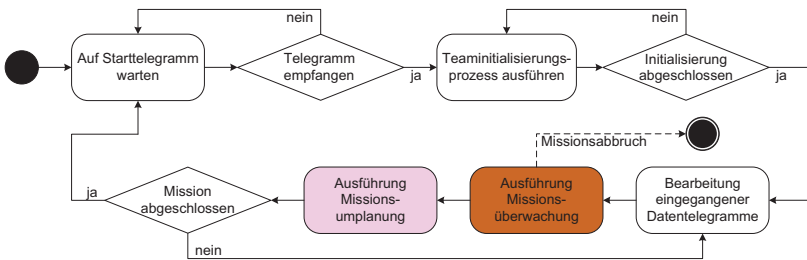


Abbildung 5.3: Durch die Hauptroutine gesteuerter Prozessablauf des Teammanagements

Der obere Teil des in Abbildung 5.3 dargestellten Ablaufschemas stellt den Start- und Initialisierungsprozess des Systems dar. Dieser ist im Unterabschnitt 5.2.1 eingehend beschrieben und wird zugunsten der Vollständigkeit an dieser Stelle einführend grafisch dargestellt. Der untere Teil des Ablaufdiagramms beschreibt den Ablaufzyklus während der Ausführung einer Mission und somit den Kernpunkt des vorgestellten Managementsystems, welcher in den folgenden Abschnitten näher erläutert wird. Weiterhin benötigt das vorgestellte System eine Möglichkeit zur Speicherung und Aufarbeitung missionsrelevanter Informationen. Dies übernimmt ein zentrales *Datenmanagement* und bildet dadurch die Basis des Teammanagementsystems.

5.1.1 Datenmanagement

Das Datenmanagement stellt den ersten Teil des realisierten Managementsystems für Teams autonomer maritimer Systeme dar. Es dient einerseits der Speicherung der Fahrzeugdaten aller an einer Mission beteiligten Fahrzeuge sowie der aktuellen Missionsdaten. Auf der anderen Seite stellt es aufbereitete Daten über ein Funktionsinterface anderen Prozessen zur Verfügung. Abbildung 5.4 zeigt den schematischen Aufbau des Datenmanagements.

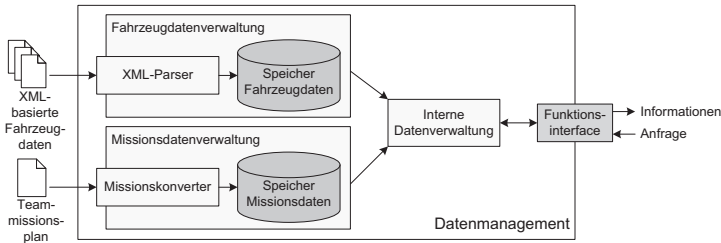


Abbildung 5.4: Aufbau des Datenmanagements innerhalb des Teammanagements

Die Hauptaufgabe des Datenmanagements ist es, andere Prozesse des Teammanagements mit missionsbezogenen Daten zu unterstützen. Dies geschieht über das in Abbildung 5.4 dargestellte *Funktionsinterface*. Diese Schnittstelle erlaubt ein Abfragen grundlegender Informationen wie spezifischer Fahrzeugdaten oder aktueller Manöverelementdaten, die durch die *Interne Datenverwaltung* aufbereitet und an die anfragenden Prozesse gesendet werden. Als Grundlage dienen die zu Beginn einer Mission geladenen und im Speicher hinterlegten Daten der *Fahrzeug-* und *Missionsdatenverwaltung*, welche über die *XML-basierten Fahrzeugdaten* sowie den *Teammissionsplan* zur Verfügung stehen. Wie in Abschnitt 3.2 beschrieben, beinhaltet der *Teammissionsplan* dabei alle notwendigen Informationen zu den Dateinamen der benötigten Fahrzeugdateien. Der Zugriff und das Laden der entsprechenden Dateien wird über die eingebetteten Module *Missionskonverter* und *XML-Parser* realisiert. Das Datenmanagement ist somit unabhängig von der Struktur der Informationsträger. Bei Änderungen des Daten-

formats ist lediglich eine Anpassung bzw. ein Wechsel der entsprechenden Konverter- oder Parsermodule erforderlich, wodurch Änderungen des Basissystems oder gar anderer Module des Teammanagements vermieden werden. Ein weiterer Vorteil dieser Datenrepräsentation ergibt sich durch die statische Informationsschnittstelle, da sowohl die Missionsüberwachung als auch die Missionsumplanung weder Kenntnis der Datenstruktur noch interner Abläufe des Datenmanagements benötigen. Änderungen im Datenmanagement haben somit keine direkten Auswirkungen auf die weiteren Module des Teammanagements.

5.1.2 Missionsüberwachung

Die Missionsüberwachung stellt innerhalb des Teammanagements die erste der beiden Verarbeitungsstufen dar. Sie ist verantwortlich für die Überwachung der aktuellen Fahrzeug- und Missionszustände sowie für das Erzeugen von Umlanungsbefehlen, welche in der zweiten Stufe des Systems abgearbeitet werden. Das Konzept basiert dabei auf dem in [KMB92] vorgestellten Rational Behavior Model. Abbildung 5.5 zeigt das innerhalb der Missionsüberwachung realisierte und verwendete Modell.

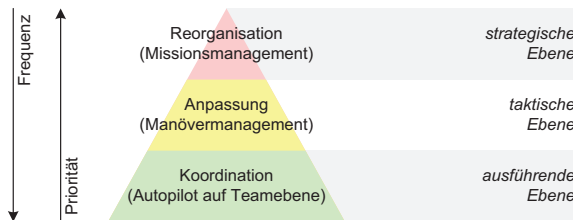


Abbildung 5.5: Ebenen der Missionsüberwachung entsprechend dem Rational Behavior Model

Dabei werden drei Ebenen unterschieden, welche, wie in Abbildung 5.5 dargestellt, eine von der niedrigsten zur höchsten Ebene wachsende Bedeutung in der Entscheidungshierarchie besitzen. Entscheidungen mit der höchsten Priorität werden daher,

basierend auf der Beobachtung des Missions- und Kommunikationsverlaufs, innerhalb der *strategischen Ebene* getroffen. Dazu zählen unter anderem:

- Überprüfung der Missionszeit
- Überprüfung, ob sich das Fahrzeug innerhalb des definierten Missionsgebiets sowie der erlaubten Missionstiefe bewegt
- Überprüfung auf fehlerhafte oder abgelehnte Umplanningbefehle.

Die *strategische Ebene* ist damit verantwortlich für einen reibungslosen Missionsablauf und für die Sicherheit der Fahrzeuge. Aus diesem Grund kann sie, insofern definierte Missionsparameter überschritten werden oder Fehler bei einer Umplanung auftreten, als einzige Instanz eine Mission vorzeitig abbrechen. Eine Umstrukturierung oder Optimierung einer Mission ist durch die strikten Vorgaben der Fahrzeugbetreiber nicht gestattet. Jegliche Umplanung einer Mission beschränkt sich daher auf die Modifizierung bestehender Elemente und ist der *taktischen Ebene* vorbehalten. Sie weist den größten Anteil an Algorithmik innerhalb des Teammanagements auf, um eine korrekte Ausführung der Missionselemente und damit verbunden die Koordinierung eines Fahrzeugteams zu ermöglichen. Dies wird auf der einen Seite durch die Überwachung des aktuellen Manövers bezüglich spezifischer Definitionen erreicht, wie eine begrenzte Manöverdauer oder ein festgesetztes Manövergebiet. Auf der anderen Seite erlaubt die Implementierung komplexer Algorithmen die Realisierung komplexer Missionsszenarien, zum Einnehmen einer definierten Formation [HGP⁺09] oder zum Verfolgen eines Zieles [GSO09]. Da diese Berechnungen lediglich während der Neu- bzw. Umplanungsphase aktiv sind, besitzt die *taktische Ebene* eine mittlere Ausführungsfrequenz. Einfache Algorithmen mit einer hohen Ausführungsfrequenz finden sich daher in der *ausführenden Ebene*. Umplanningbefehle dieser Ebene besitzen keinen zeit- oder missionskritischen Einfluss und weisen daher die geringste Priorität auf. Daher werden sie lediglich zur Umplanung des lokalen Fahrzeugs genutzt und dienen der Anpassung der Geschwindigkeit, um die definierte Formation des Verbands aufrecht zu erhalten.

Innerhalb eines Prozessdurchlaufs werden alle Ebenen der Missionsüberwachung abgearbeitet und erzeugen, insofern die Notwendigkeit besteht, Befehlstelegramme. Hochpriorisierte Befehle der *strategischen Ebene* werden umgehend ausgeführt, um die Sicherheit der Fahrzeuge zu gewährleisten. Im Gegensatz dazu werden Umplanungsbefehle der niederpriorisierten Ebenen zur weiteren Bearbeitung an die Missionsumplanung übergeben.

5.1.3 Missionsumplanung

Die Missionsumplanung bildet die zweite Stufe des vorgestellten Teammanagementkonzepts. Sie ist verantwortlich für die Prüfung und Umsetzung aller Umplanungsbefehle der lokalen Missionsüberwachung sowie der Aufbereitung globaler Umplanungsbefehle des als Master eingestuft Systems (siehe Abschnitt 5.2, S. 92). Der Einflussbereich der Missionsumplanung, deren Aufbau innerhalb des Teammanagements in Abbildung 5.6 dargestellt wird, beschränkt sich dabei auf lokale Umplanungen des eigenen Fahrzeugs.

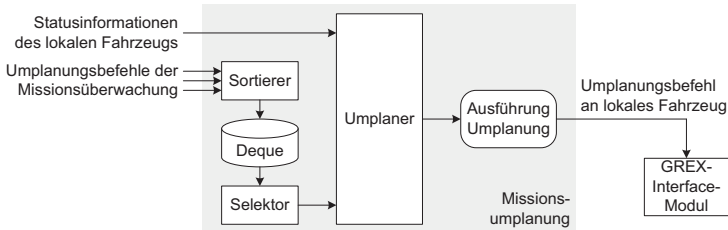


Abbildung 5.6: Aufbau der Missionsumplanung innerhalb des Teammanagements

Im ersten Abschnitt der Missionsumplanung werden alle Befehle der Missionsüberwachung durch den *Sortierer*, entsprechend ihrer Priorität, in einem Stapelspeicher abgelegt. Dieser ist in Abbildung 5.6 mit *Deque* gekennzeichnet. Der *Sortierer* prüft dabei ebenfalls den Typ der Umplanung und ersetzt veraltete Umplanungsbefehle. Somit wird ein Anwachsen des Befehlsspeichers und das Senden überholter Befehle an

das Fahrzeug verhindert. Ein weiterer Vorteil dieses Verfahrens ist, dass Algorithmen mit einem hohen Befehlsdurchsatz nicht verzögert werden müssen und zu jedem Zeitpunkt das aktuelle Ergebnis für eine Umplanung bereitsteht.

Der zweite Teil der Missionsumplanung beinhaltet die Aufbereitung von Befehlen der Missionsüberwachung in Umplanungskommandos für das jeweilige Fahrzeug. Diese ist notwendig, da die Befehle der Missionsüberwachung lediglich Basisinformationen für eine Umplanung enthalten, welche nicht direkt auf den Missionsplan angewendet werden können. Weiterhin erfordern komplexe Befehle zumeist mehrere einzelne Umplanungsschritte. Da aus Sicherheitsgründen aber jeweils nur eine Umplanung vom Fahrzeug abgearbeitet wird, muss dieser Zyklus separat vom ersten Teil der Missionsumplanung arbeiten. Dies wird durch den in Abbildung 5.6 dargestellten *Umplaner* realisiert, welcher nach erfolgreicher Umsetzung eines Umplanungspakets über den *Selektor* den nächsten auszuführenden Befehl bezieht. Dieser Zyklus wiederholt sich bis eine Mission erfolgreich abgeschlossen ist oder durch die Missionsüberwachung abgebrochen wird.

5.2 Koordination von Verbänden maritimer Fahrzeuge

Um mit Hilfe des Teammanagements Verbände von Fahrzeugen koordinieren zu können, bedarf es im weiteren Verlauf eines Einsatzkonzepts. Für die Umsetzung des vorgestellten Systems wird daher eine Unterteilung in Master- und Slave-Systeme vorgenommen. Dies bestimmt maßgeblich die Aufgaben der einzelnen an einer Mission beteiligten Fahrzeuge. Die Festlegung, welches Fahrzeug innerhalb eines Teams eine Führungsrolle einnimmt, wird während der Missionsplanung entschieden und ist im Missionsplan verankert. Die Rolle des Führungsfahrzeugs (Master) ist dabei manöverabhängig und kann daher innerhalb einer Mission wechseln. Diese Flexibilität stellt einen großen Vorteil der entwickelten Gesamtlösung dar und ist angelehnt an das Konzept der Adaptiven Bioorientierten Autonomie [Glo09].

Im Allgemeinen gibt es in einer Gruppe von Fahrzeugen lediglich einen Master. Dieser ist verantwortlich für alle Koordinierungsaufgaben die den Fahrzeugverband betreffen

sowie für die Ausführung von Algorithmen zur Berechnung von Umplanungen innerhalb komplexer Manöver. Die als Slave eingestuft Systemen haben keine teamrelevanten Aufgaben. Sie führen lediglich eine lokale, das jeweilige Fahrzeug betreffende, Koordinierung durch. Abbildung 5.7 verdeutlicht das eingesetzte Prinzip grafisch.

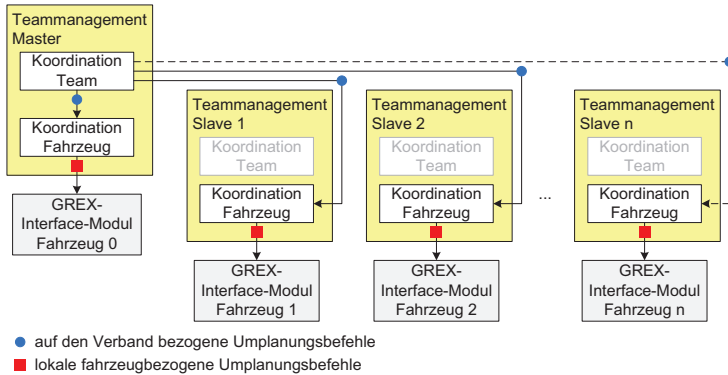


Abbildung 5.7: Master-Slave-Konzept für die Realisierung kooperierender Fahrzeugverbände auf Basis des Teammanagements

Der Aufbau der Managementsysteme ist dabei in allen Fahrzeugen identisch. Wie Abbildung 5.7 zeigt, sind innerhalb der als *Slave* eingestuften Systeme die Funktionalitäten der Teamkoordination deaktiviert. Für die Realisierung komplexer Szenarien können diese Fähigkeiten temporär aktiviert werden, um mehrere, getrennt agierende, Untergruppen zu erlauben. Weiterhin bietet dieses Konzept die Möglichkeit während einer Mission ein anderes Fahrzeug mit den Aufgaben der Teamkoordination zu betrauen.

Abbildung 5.7 unterscheidet zwischen globalen und lokalen Befehls- sowie Umplanungsarten. Lokale Befehle und Umplanungen werden von allen Systemen durchgeführt und betreffen nur das jeweilige Fahrzeug. Sie resultieren aus lokal installierter Algorithmik oder basieren auf Nachrichten des Master-Systems, den globalen Befehlen und Umplanungen.

5.2.1 Initialisierung eines Fahrzeugverbands

Die Initialisierung eines Fahrzeugverbands beschreibt die ersten Umplanungs- und Koordinierungsschritte in der Startphase einer Mission. Dieser Vorgang wird mit dem Einschalten eines Systems eingeleitet und beginnt mit fahrzeugeigenen Startroutinen sowie dem Aufbau des Kommunikationsnetzwerks zwischen den einzelnen GREX-Modulen. Da sich die Fahrzeuge zu dieser Zeit bereits im Wasser befinden, müssen sie, um die Sicherheit aller zu gewährleisten, bis zum regulären Start der Mission ihre Position halten und den Anweisungen des Teammanagements folgen. Ist der Name der Missionsdatei den Systemen bekannt, so wird diese direkt nach dem Start durch das Teammanagement geladen und der Initialisierungszyklus gestartet. Alternativ verweilen alle Systeme in einem Wartezustand bis sie durch ein definiertes Starttelegramm über den Namen der Missionsdatei informiert werden. Im Anschluss erfolgt die Konfiguration des Teammanagements anhand der im Missionsplan enthaltenen Daten. Dies beinhaltet neben der Einstufung in ein Master- oder Slave-System das Laden der spezifischen Fahrzeugdaten, welche mindestens vom ausführenden Fahrzeug vorliegen müssen. Fehlende Fahrzeugdaten werden automatisch vom Teammanagement der anderen Missionsteilnehmer abgefragt, um einen vollständigen Datensatz zur Initialisierung des Navigationsmoduls aber auch für die Berechnungen der Missionsüberwachung bereitstellen zu können.

Sind diese Schritte erfolgreich abgearbeitet, wird das jeweilige Fahrzeug vom Teammanagement zum Laden der Mission aufgefordert. Zu diesem Zeitpunkt beginnt der in Abbildung 5.8 dargestellte lokale Initialisierungszyklus, nach dessen Abschluss das Fahrzeug den Missionsplan ausführen darf. Da zur Zeit der Planung die Startposition der Fahrzeuge nicht bekannt ist, würde ein sofortiger Beginn der Mission dazu führen, dass das Fahrzeug versucht, die Platzhalterposition anzufahren. Aus diesem Grund müssen vom Teammanagement alle Wartemanöver und somit alle Manöver mit einer Platzhalterposition vor dem Start umgeplant werden. Um weiterhin einen reibungslosen Start der Mission zu erlauben, ist es notwendig, die aktuelle Halteposition des Fahrzeugs in das erste Wartemanöver des Missionsplans einzufügen. Daher fordert das

Teammanagement, wie in Abbildung 5.8 dargestellt, das Interfacemodul zum Senden dieser Position auf, insofern es dies nicht automatisch vornimmt.

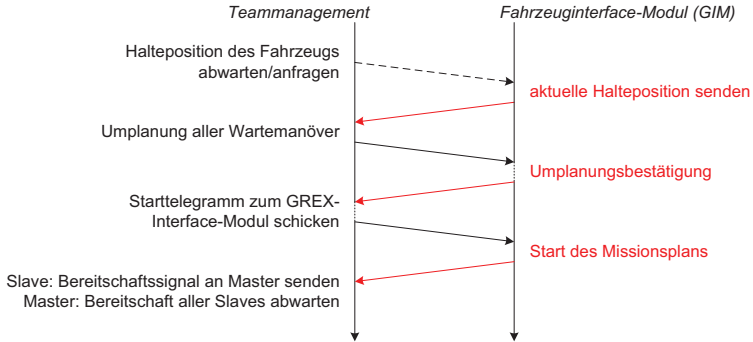


Abbildung 5.8: Lokaler Initialisierungszyklus zwischen dem Teammanagement und dem Interfacemodul eines Fahrzeugs

Die Halteposition muss dabei, je nach Fahrzeugtyp, nicht der tatsächlichen Position des Fahrzeugs entsprechen. Das Halten einer Position stellt für autonome maritime Fahrzeuge nach wie vor eine Herausforderung dar, weshalb einige Hersteller ein Ersatzmanöver nutzen, um der eingeschränkten Manövrierfähigkeit des Fahrzeugs entgegenzuwirken. Abbildung 5.9 zeigt zwei gängige Ersatzmanöver.

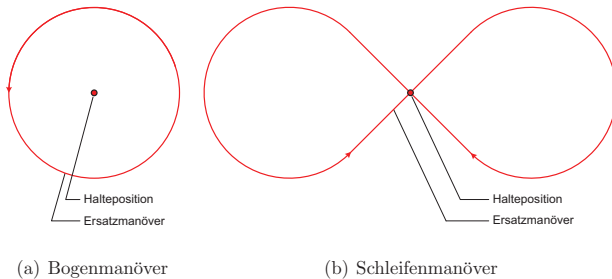


Abbildung 5.9: Ersatzmanöver zum Halten einer Position

Da die Abstände zwischen einem Ersatzmanöver und dem Haltepunkt bis über 30 m betragen können, ist es notwendig, den realen Haltepunkt des Fahrzeugs in das erste Wartemanöver einzufügen. Nutzt man stattdessen die aktuelle Fahrzeugposition für die Umplanung, würde das Fahrzeug beginnen sein Haltemanöver um diese Position zu realisieren und dadurch unbeabsichtigt eine Verlagerung vornehmen. In diesem Fall kann es zu Gefahrensituationen mit anderen, in der Nähe befindlichen Fahrzeugen, kommen.

Nachdem die erste Warteposition erfolgreich umgeplant ist, werden die Positionen aller verbleibenden Wartemanöver mit der Endposition des jeweils vorhergehenden Manövers ersetzt. Dies erleichtert den weiteren Missionsverlauf, da nicht kurz vor dem Einleiten eines Wartemanövers dessen Position geprüft oder geändert werden muss. Nachdem alle Umplanungen vom Fahrzeug umgesetzt wurden, sendet das Teammanagement ein Starttelegramm an das Interface-Modul, welches das Fahrzeug dazu veranlasst, den Missionsplan zu starten. Entsprechend den bisherigen Umplanungen wird das erste Wartemanöver ausgeführt, welches nach den erfolgten Umplanungen bereits die aktuelle Halteposition des Fahrzeugs enthält. Wird die Ausführung des Missionsplans durch das Fahrzeug bestätigt, ist der lokale Initialisierungszyklus abgeschlossen. Handelt es sich um das im Missionsplan als Master eingestufte System, wartet das Teammanagement im Anschluss auf die Bereitschaftstelegramme aller an der Mission beteiligten Fahrzeuge. Die als Slave eingestuften Systeme signalisieren nach der erfolgreichen lokalen Initialisierung ihre Bereitschaft zum Beginn der Teammission durch das Senden eines Bereitschaftstelegramms an das Master-System. Das Teammanagement ist dabei so ausgelegt, dass die Reihenfolge der Fahrzeugstarts keine Rolle spielt. Es müssen jedoch alle Systeme diesen Zyklus innerhalb der im Missionsplan definierten Gesamtmissionszeit abschließen, da dieser Wert innerhalb der Wartemanöver genutzt wird. Sollte er erreicht werden, ist die Mission automatisch beendet.

Das Beenden des lokalen Initialisierungszyklus leitet den vom Master-System koordinierten zweiten Teil der Initialisierungsphase ein, welcher in Abbildung 5.10 dargestellt ist. Dieser wartet zu Beginn auf die Bereitschaftstelegramme aller an der Mission teilnehmenden und als Slave eingestuften Systeme. Erhalten diese darauf ein Bestä-

tigungstelegramm, senden sie ihre jeweiligen Halteposition an das Master-System, da diese im späteren Missionsverlauf zum Einnehmen der Startformation benötigt wird.

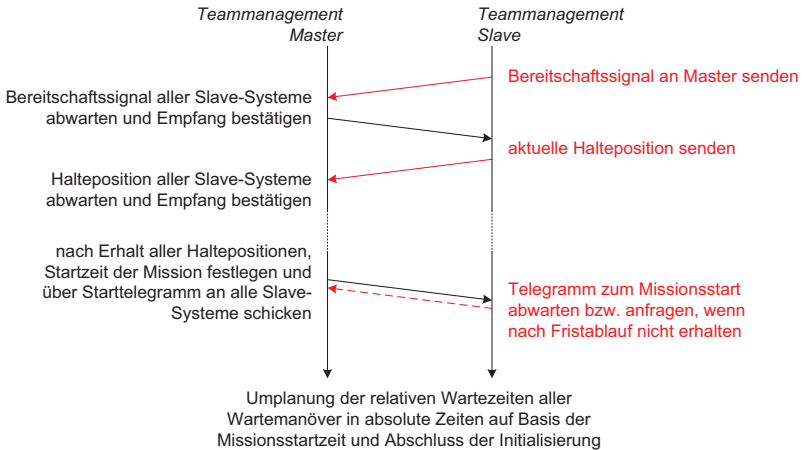


Abbildung 5.10: *Globaler Initialisierungszyklus zwischen den unterschiedlichen Teammanagementinstanzen*

Sobald das Teammanagement des Master-Systems die Haltepositionen aller Fahrzeuge erhalten hat, bestimmt es anhand der eigenen Systemzeit eine absolute Startzeit der Mission und sendet diese in Form eines Telegramms an alle Teammitglieder. Auf Basis dieser Zeit werden im weiteren Verlauf alle relativen Wartezeiten im Missionsplan durch eine absolute Zeit ersetzt. Mit dem Absenken der Wartezeit des aktuellen Manövers auf wenige Sekunden (Standardwert: 5 s) und den Start des ersten Missionselements, welches laut Definition ein formationsbildendes Manöver beinhalten muss, wird die Initialisierung abgeschlossen. Eine Schilderung des folgenden Missionsverlaufs findet sich in Unterabschnitt 5.2.3.

Während der Initialisierung – aber vor allem für einen reibungslosen Missionsverlauf – ist es notwendig, dass die Zeiten der einzelnen Systeme synchronisiert sind. Bereits eine Abweichung von mehreren Sekunden kann durch einen verzögerten oder verfrüh-

ten Start von Missionselementen einen negativen Einfluss auf den Verlauf haben. Aus diesem Grund bietet das vorgestellte Teammanagementsystem allen Slave-Systemen die Möglichkeit, sich mit der lokalen Zeit des Master-Systems zu synchronisieren. Das implementierte Verfahren ist dem Berkeley-Algorithmus [GZ83] entnommen, welcher bei der Uhrensynchronisation in verteilten Systemen eingesetzt wird. Ein zentraler Zeitserver berechnet dabei auf Basis der Zeitinformationen mehrerer Clientsysteme eine Zeitanpassung für diese, um eine Uhrensynchronisation zu erreichen. Dieses Verfahren läuft dabei kontinuierlich und wird im Teammanagement in vereinfachter Form lediglich zu Beginn und auf Basis der Zeit des Master-Systems durchgeführt. Die Synchronisierung ist dabei jedem Slave-System freigestellt und kann über eine Konfigurationsdatei aktiviert und deaktiviert werden. Will ein Slave-System seine Zeit mit dem Master-System synchronisieren, so findet dieser Vorgang vor der lokalen Initialisierungsphase statt und ist unabhängig vom derzeitigen Initialisierungszustand des Master-Systems. Abbildung 5.11 zeigt den grundlegenden Ablauf der Zeitanpassung.

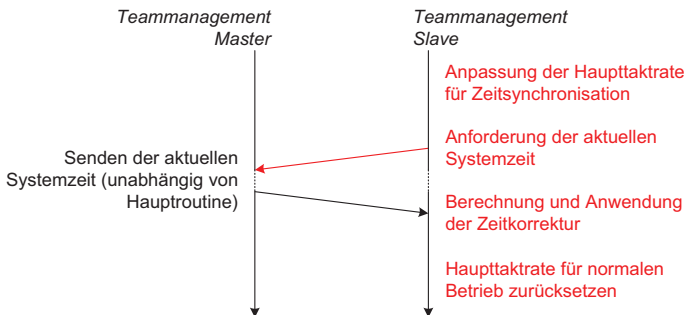


Abbildung 5.11: Zeitsynchronisierung zwischen Teammanagementinstanzen

Bevor die lokale Zeit des Master-Systems angefragt wird, erhöht das Slave-System die Taktrate der Hauptroutine von standardmäßig 4 Hz auf mindestens 20 Hz. Da die darauf folgende Anfrage der Systemzeit innerhalb des Teammanagements des Master-Systems umgehend und unabhängig von der Hauptroutine abgearbeitet wird, kann auf diese Weise ein relativ genauer Korrekturwert für die lokale Systemzeit berechnet wer-

den. Dieser Vorgang kann mehrfach wiederholt werden, um einen günstigen mittleren Korrekturwert auf Basis der errechneten Abweichung zum Master-System zu bestimmen. Im Anschluss wird der berechnete Wert auf die lokale Systemzeit angewandt und die Taktrate der Hauptroutine zurückgesetzt. Die Synchronisierung ist somit abgeschlossen und erreicht Abweichungen von unter 100 ms. Das ist für die Koordination eines Fahrzeugverbands mit den vorgestellten Szenarien mehr als ausreichend. Die vorgestellte Methode arbeitet dabei unabhängig von der gewählten Zeitzone des Systems, da sie sich lediglich auf die reale Systemzeit bezieht.

5.2.2 Koordination innerhalb von Basismanövern

Die einfachste Form der Koordination eines Fahrzeugverbands findet sich in Bogen- sowie Streckenmanövern und wird über die *ausführende Ebene* der Missionsüberwachung in Zusammenarbeit mit der Missionsumplanung realisiert. Innerhalb des jeweiligen Teammanagements wird auf dieser Basis eine Anpassung der Geschwindigkeit des Fahrzeuges ermöglicht, um eine definierte Formation des Verbands aufrecht zu erhalten. Der zur Berechnung der Geschwindigkeitsanpassung implementierte Algorithmus nutzt dabei den Manöverfortschritt aller Fahrzeuge und beschreibt das Verhältnis der abgefahrenen Manöverstrecke zur gesamten Manöverstrecke. Um diesen bestimmen zu können, ist die aktuelle Position der Missionsteilnehmer notwendig, welche aufgrund der eingeschränkten Kommunikation im maritimen Bereich nicht vorausgesetzt werden kann. Eine ausführlichere Untersuchung dieser Problematik findet sich in den Veröffentlichungen [SGJ⁺07] sowie [SGJ⁺08], welche einen Kalman-Filter basierten Lösungsansatz präsentieren. Innerhalb der GREX-Systemlösung übernimmt das *Teamnavigations-Modul* diese Aufgabe und bildet damit die Grundlage zur Berechnung des Manöverfortschritts aller an der Mission beteiligten Fahrzeuge.

Da die Missionspläne aller Fahrzeuge dem Teammanagement bekannt sind, kann auf dieser Basis der Fortschrittswert der einzelnen Teammitglieder berechnet werden. Abbildung 5.12 illustriert den für die Berechnung genutzten Ansatz.

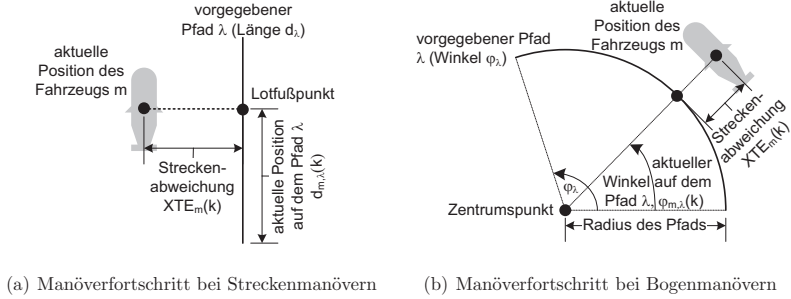


Abbildung 5.12: Berechnung des Manöverfortschritts bei Strecken- und Bogenmanövern

Da in keinem Fall von einer exakten Pfadverfolgung ausgegangen werden kann, wird zur Berechnung des Fortschrittswertes eines Streckenmanövers, wie in Abbildung 5.12(a) gezeigt, der Lotfußpunkt auf dem Pfad genutzt. Auf dieser Basis kann die Länge des abgefahrenen Abschnitts $d_{m,\lambda}(k)$ berechnet und ins Verhältnis zur Gesamtlänge der Strecke d_λ gesetzt werden. Somit ergibt sich für den Missionsfortschritt Θ_m auf einem Streckenabschnitt der in Gleichung 5.1 beschriebene Zusammenhang.

$$\Theta_m(k) = \frac{d_{m,\lambda}(k)}{d_\lambda}. \quad (5.1)$$

Angelehnt an die Berechnung des Missionsfortschritts für ein Streckenmanöver wird innerhalb eines Bogenmanövers, siehe Abbildung 5.12(b), die Berechnung über den aktuellen Winkel innerhalb des Kreises $\varphi_{m,\lambda}(k)$ realisiert. Betrachtet man das Verhältnis dieses Winkels zum Gesamtwinkel des Kreises φ_λ , welcher für alle Fahrzeuge gleich ist, erhält man den zugehörigen Missionsfortschritt nach Gleichung 5.2. Abweichungen des Fahrzeugs vom vorgegebenen Pfad werden somit außer Acht gelassen.

$$\Theta_m(k) = \frac{\varphi_{m,\lambda}(k)}{\varphi_\lambda}. \quad (5.2)$$

Die Aufgabe der Koordination besteht im Anschluss darin, die einzelnen Fortschrittswerte $\Theta_m(k)$ der Fahrzeuge auf Basis einer neuen Manövergeschwindigkeit $\nu_{m,\lambda}(k)$ für

das jeweilige Fahrzeug anzugleichen. Das Konzept wird in [GPSC05] vorgestellt und ist, basierend auf einem PI-Regler, in die *ausführende Ebene* des Teammanagements integriert. Die Differenz von $\Theta_m(k)$ des eigenen Fahrzeugs mit dem Wert von $\Theta_i(k)$ aller weiteren Teammitglieder bildet die Grundlage der in Gleichung 5.3 präsentierten Berechnungsvorschrift zur Bestimmung der zum Erhalt der Formation notwendigen Geschwindigkeitsänderung $\Delta\nu_{m,\lambda}(k)$ des Fahrzeugs m :

$$\Delta\nu_{m,\lambda}(k) = -K_1 \tanh \left[K_2 \left(\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n, \neq m} (\Theta_m(k) - \Theta_i(k)) \right) \right] + \xi_m(k) \quad (5.3)$$

Das Ergebnis der Differenzbildung wird über alle Fahrzeuge aufsummiert und im Anschluss über die Anzahl der Fahrzeuge normiert sowie mit einer konfigurierbaren Verstärkung K_2 multipliziert. Über die Verwendung des \tanh wird anschließend der Wertebereich auf die durch die Verstärkung K_1 vorgegebene Größe begrenzt. Somit ergibt sich nach der Addition des Ergebnisses mit dem I-Anteil des Regelkonzepts $\xi_m(k)$ der Wert der Geschwindigkeitsanpassung für das jeweilige Fahrzeug im aktuellen Zeitschritt k . Die Berechnung des integralen Anteils ist in Gleichung 5.4 dargestellt und ergibt sich aus der Addition des I-Anteils des vorherigen Zeitschritts $\xi_m(k-1)$ mit der durch K_3 gewichteten und über T_{k-1} zeitabhängigen Summe der beschriebenen Differenzbildung.

$$\xi_m(k) = \xi_m(k-1) - K_3 \tanh \left[K_2 \left(\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n, \neq m} (\Theta_m(k) - \Theta_i(k)) \right) \right] \cdot T_{k-1} \quad (5.4)$$

Addiert man dazu den im Missionsplan vorgegebenen Geschwindigkeitswert $\nu'_{m,\lambda}(k)$, erhält man die neue Manövergeschwindigkeit $\nu_{m,\lambda}(k)$ des Fahrzeugs m . Der implementierte Regler hat somit die Aufgabe das Qualitätskriterium Q_m über alle Fahrzeuge zu minimieren. Q_m ist wie folgt definiert:

$$\forall m Q_m = \sum_{i=1}^{p, \neq m} \Delta\Theta_i(k) = \sum_{i=1}^{p, \neq m} (\Theta_m(k) - \Theta_i(k)) \Rightarrow \min. \quad (5.5)$$

Um einen steigenden Einfluss des I-Anteils $\xi_m(k)$ auf die Manövergeschwindigkeit zu vermeiden, wird auf einem Fahrzeug lediglich der P-Anteil des in Gleichung 5.3 vorgestellten Reglerkonzepts genutzt. Dieses Fahrzeug dient somit als Sollwertvorgabe

für alle anderen Mitglieder des Verbands. Ohne diese Maßnahme wäre der Einfluss des I-Anteils nahezu permanent und würde das Erreichen der definierten Manövergeschwindigkeit $\nu'_{m,\lambda}$ verhindern. Des Weiteren wird $\xi_m(k)$ durch die Nutzung einer „anti-windup“-Funktion begrenzt. Überschreitet $\xi_m(k)$ einen definierten Schwellwert, wird für die Berechnungen des nächsten Zeitschritts, der Wert von $\xi_m(k - 1)$ genutzt. Ein unkontrollierter Anstieg des I-Anteils wird dadurch unterbunden.

Die Nutzung des vorgestellten Konzepts innerhalb des Teammanagements erfordert eine Anpassung an die bestehende Missionsdefinition, da die Manövergeschwindigkeit $\nu'_{m,\lambda}$, welche im Missionsplan vorgegeben ist, innerhalb von Bogen- und Punktmanövern für alle Fahrzeuge den gleichen Wert aufweist. Unverändert würde der Algorithmus somit lediglich für Punktmanöver zum gewünschten Erfolg führen, da Bogenmanöver für die einzelnen Fahrzeuge eines Verbands unterschiedliche Längen aufweisen. Um innerhalb dieses Manövertyps eine Formation aufrecht zu erhalten, ist es notwendig, die Geschwindigkeiten entsprechend der Bogenlängen anzupassen. Diese Anpassung darf nicht vorab durch eine Neuberechnung der Manövergeschwindigkeit $\nu'_{m,\lambda}$ geschehen, da die Berechnung der Geschwindigkeitsänderung auf Basis gleicher Streckenlängen geschieht und somit eine identische Referenzgeschwindigkeit in einem Manöver aller Fahrzeuge als Grundlage dienen muss. Daher wird auf Grundlage der Bogenlängen der einzelnen Fahrzeuge innerhalb eines Manövers, für jedes Fahrzeug ein Korrekturfaktor γ_m berechnet, welcher das Längenverhältnis zur kleinsten Bogenlänge beschreibt.

$$\gamma_m = \frac{d_{m,\lambda}}{\min[d_{m,\lambda}(k)]} \quad (5.6)$$

Dieser Faktor dient der Erweiterung des bestehenden Konzepts, siehe Gleichung 5.7, und ermöglicht die Anpassung der berechneten Geschwindigkeit entsprechend der Pfadlänge eines jeden Fahrzeugs innerhalb des Manövers sowie die Aufrechterhaltung der Formation.

$$\nu_{m,\lambda}(k) = \left(\nu'_{m,\lambda}(k) + \Delta\nu_{m,\lambda}(k) \right) \gamma_m \quad (5.7)$$

Des Weiteren ist eine Überprüfung der resultierenden Geschwindigkeit $\nu_{m,\lambda}(k)$ notwendig, bevor diese durch ein Umplanungstelegramm an das Fahrzeug gesendet wird, um

erforderliche Minimal- und Maximalgeschwindigkeiten der Fahrzeuge nicht zu unter- bzw. überschreiten. Das auf dieser Basis realisierte Umplanungssystem läuft auf allen an einer Mission beteiligten Fahrzeugen und bildet damit die Grundlage für eine koordinierte Abfahrt der vorgegebenen Manöverabschnitte.

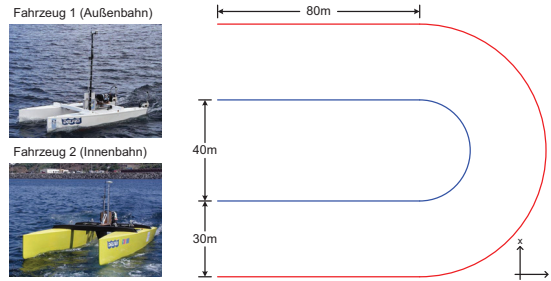


Abbildung 5.13: Testmission für die Koordination zweier Fahrzeuge unter realen Bedingungen

Abbildung 5.13 zeigt den Aufbau einer realen Testmission, deren Ergebnisse die Arbeitsweise der vorgestellten Algorithmik belegen. Wie in Abbildung 5.13 dargestellt, besteht die Mission aus jeweils zwei Streckenmanövern, welche durch ein 180° Bogenmanöver verbunden sind. Die angesetzte Missionsgeschwindigkeit beträgt 0.5 m/s.

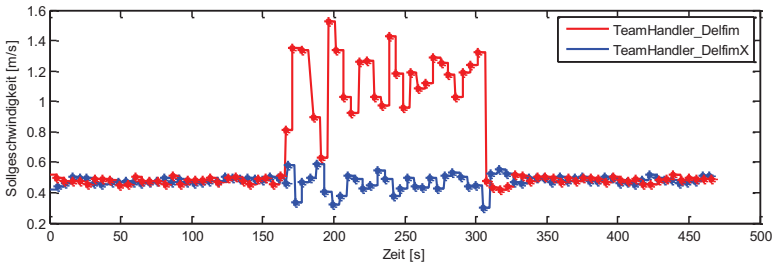


Abbildung 5.14: Geschwindigkeitsumplanungen zweier Fahrzeuge während einer realen Strecke-Kreisbogen-Strecke Mission

Alle während des Missionsverlaufs realisierten Geschwindigkeitsumplanungen beider Fahrzeuge, Delfim und DelfimX, sind in Abbildung 5.14 gegenübergestellt und bestätigen das vorgestellte Koordinierungskonzept. Deutlich erkennbar sind die Geschwindigkeitsänderungen während des Bogenabschnitts. Diese sind zum einen durch den großen Längenunterschied der beiden Bogenelemente zu erklären, zum anderen durch äußere Einflüsse wie Seeströmung und Wind. Daher erreicht die Sollgeschwindigkeit des Fahrzeugs Delfim zwischenzeitlich die erlaubte Höchstgeschwindigkeit von 1.5 m/s.

5.2.3 Koordination innerhalb komplexer Manöver

Komplexe Manöver beschreiben Missionsszenarien, deren Pfadverlauf in der Planungsphase einer Mission nicht bestimmt werden kann. Sie erfordern spezielle Algorithmen, die es erlauben, während der Ausführung einer Mission, die notwendigen Pfade für den Verband zu berechnen. Innerhalb des Teammanagements sind diese in der *taktischen Ebene* der Missionsüberwachung eingebettet und ermöglichen mit Hilfe der Missionsumplanung die Realisierung komplexer Szenarios.

Das vorgestellte Konzept basiert dabei im Gegensatz zu den Berechnungen für Basismanöver auf einem zentralen Ansatz. Algorithmen zum Berechnen der manöverspezifischen Pfade für alle Fahrzeuge, welche komplette Missionselemente enthalten können, werden somit nur auf einem, dem als Master eingestuft, System ausgeführt und anschließend an alle weiteren Teammitglieder verteilt. Diese globalen Umplanungssequenzen (siehe [Sch09]) werden dabei lediglich zu den Teammanagementinstanzen gesendet und stellen keinen direkten Umplanungsbefehl für die Fahrzeuge dar. Auf diese Weise ist es möglich, Manöver abstrakt zu beschreiben und die Größe des Umplanungstelegramms gering zu halten. Innerhalb der Teamhandlerinstanzen übernimmt die Missionsumplanung die temporäre Speicherung der Umplanungspakete und bereitet diese für das jeweilige Fahrzeug auf. Dieser Schritt ist notwendig, da die Definition der Missionssprache vorsieht, dass während der Missionsausführung keine Elemente gelöscht oder hinzugefügt werden können. Aus diesem Grund bestehen alle komplexen

Manöver innerhalb des Fahrzeugmissionsplans mindestens aus zwei aufeinanderfolgenden Bogenmanövern, die sowohl mit Bogen- als auch mit Streckenmanövern umgeplant werden können. Durch die Nutzung einer alternierenden Umplanungsstrategie lassen sich Manöver beliebiger Länge realisieren, wobei die einzelnen Fahrzeuge lediglich Bogen- und Streckenmanöver ausführen und umplanen müssen. Abbildung 5.15 zeigt das angewandte Prinzip grafisch für ein allgemeingültiges Beispiel.

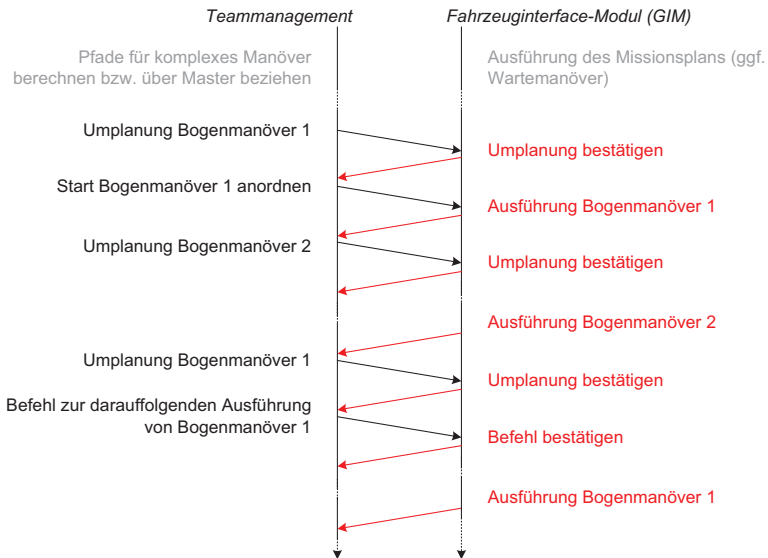


Abbildung 5.15: Alternierende Umplanungsstrategie zur Realisierung eines komplexen Manövers für ein Fahrzeug

Nachdem im Teammanagement die Pfade des komplexen Manövers bereitstehen, wird das erste der beiden Bogenmanöver entsprechend des ersten Pfadabschnitts umgeplant. Dabei sind in diesem Beispiel weder die Art des Manövers noch die Voraussetzungen zur Ausführung relevant. Wird die Umplanung durch das Fahrzeug bestätigt, ordnet das Teammanagement den Start des modifizierten Manövers an und ist in der Lage das zweite Bogenmanöver entsprechend des komplexen Missionspfads umzuplanen.

Dies muss ebenfalls vom Fahrzeug bestätigt werden. Aufgrund der Reihenfolge im Missionsplan wird das Fahrzeug nach dem Beenden des *Bogenmanövers 1* automatisch das *Bogenmanöver 2* ausführen. Ist das Ende des zu realisierenden Missionspfads nicht erreicht, wird das Teammanagement in diesem Fall das erste Bogenmanöver erneut umplanen und dem Fahrzeug signalisieren, dass nach dem aktuellen Manöver das *Bogenmanöver 1* auszuführen ist. Endet ein Missionspfad im *Bogenmanöver 1*, wird das *Bogenmanöver 2* automatisch zu einem Punktmanöver mit dem Endpunkt des Missionspfads umgeplant.

Durch die vorgestellte Befehls- und Umplanungssequenz sind auf Basis von zwei modifizierbaren Bogenmanövern beliebig lange Missionspfade realisierbar. Um eine fehlerfreie Ausführung zu gewährleisten, müssen implementierte Algorithmen die Anforderungen der Fahrzeuge (minimaler Wenderadius, minimale Streckenlänge) bei der Berechnung der Missionspfade beachten, um ein Überspringen oder die Ablehnung von Elementen und somit einen verfrühten Abbruch des komplexen Manövers zu verhindern.

Des Weiteren werden durch das Teammanagement komplexe Manöver mit passiver und aktiver Koordination unterstützt und unterschieden. Die unterschiedliche Handhabung beider Koordinationsvarianten wird im folgenden Text anhand zweier Beispiele vorgestellt:

Komplexe Manöver mit passiver Koordination

Ein komplexer Manövertyp mit passiver Koordination findet sich bei formationsbildenden Manövern. Diese werden benötigt, da eine Mission aufgrund verschiedener externer Einflüsse auf See nicht, wie im Gegensatz zu landgebundenen Systemen, aus dem Stand heraus begonnen werden kann. Das vorgestellte Teammanagementkonzept nutzt den „Go-To-Formation“-Algorithmus [HGP⁺09], um dieses Problem zu beheben. Der Algorithmus zieht gegebene Fahrzeugpositionen sowie die gewünschten Parameter zum Missionsbeginn (Position, Orientierung, Teamgeschwindigkeit) heran, um konfliktfreie Pfade und Geschwindigkeitsprofile zu erzeugen, denen die Fahrzeuge ohne aktive Ko-

ordinationskontrolle folgen können und die gewährleisten, dass die gewünschten Endpunkte gleichzeitig erreicht werden, um darauf folgende Missionselemente „fliegend“ und annähernd synchron zu beginnen. Neben dem beschriebenen Einnehmen einer Formation durch einen Verband zum Start einer Mission, wird der Algorithmus ebenfalls genutzt, um die Fahrzeuge nach einer Mission an definierte Positionen zu führen oder während einer Mission die Formation zu wechseln. Abbildung 5.16 zeigt die schematische Grundstruktur des im Teammanagement implementierten Algorithmus.

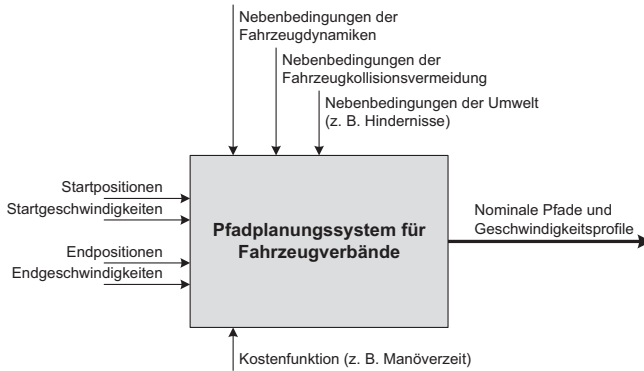


Abbildung 5.16: Grundstruktur des Pfadplanungssystems zum Aufbau einer definierten Formation [HGP⁺ 09]

Durch den zentralen Ansatz wird der Algorithmus zum Berechnen der Pfade aller Fahrzeuge lediglich auf dem als *Master* eingestufteten Fahrzeug ausgeführt und die Ergebnisse anschließend an alle weiteren Teammanagementinstanzen verteilt. Eine dezentrale Berechnung der Pfade ist theoretisch möglich, bedarf aber eines hohen Synchronisationsaufwands, da alle Fahrzeuge identische Startparameter für die Berechnung benötigen, um identische Ergebnisse und einen sicheren Missionsverlauf garantieren zu können. Die berechneten Pfade weisen eine hohe Komplexität auf und besitzen für die einzelnen Teammitglieder einen unterschiedlichen Aufbau. Eine Koordination wird während der Ausführung somit lediglich über die Sollgeschwindigkeiten der einzelnen Pfadsegmente realisiert, weshalb das Einnehmen einer definierten Formation ein komplexes

Manöver mit passiver Koordination darstellt. Eine aktive Koordination ist mit dem vorgestellten Konzept nicht möglich, da alle Fahrzeuge lediglich ihren eigenen Missionspfad kennen und umsetzen. Das in Abbildung 5.17 dargestellte Simulationsergebnis zeigt das Einnehmen einer definierten Formation durch zwei Fahrzeuge zu Beginn einer kurzen Testmission.

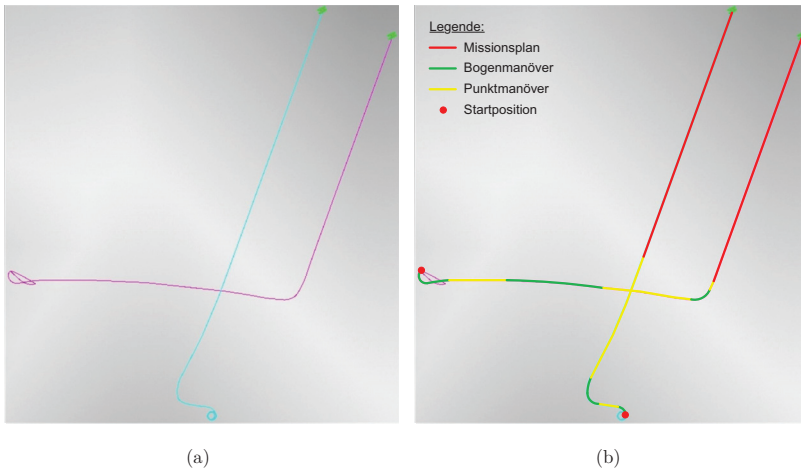


Abbildung 5.17: *Simulationsergebnis des formationsbildenden Algorithmus zu Beginn einer Testmission mit zwei Fahrzeugen (a) sowie die Darstellung der relevanten Fahrzeugpfadabschnitte (b)*

Abbildung 5.17(b) verdeutlicht die Realisierung des Algorithmus innerhalb des Teammanagements und zeigt neben den einzelnen Pfadabschnitten der beiden Fahrzeuge deren Startpunkte sowie die vorab geplante Mission.

Formationsbildende Manöver werden innerhalb des vorgestellten Konzepts durch ein Wartemanöver eingeleitet, welches automatisch von allen Fahrzeugen ausgeführt wird. Dies stellt sicher, dass die Fahrzeuge an einer sicheren Position warten, während die notwendigen Prüfungen, Berechnungen und der anschließende Informationsaustausch zum Ausführen des Manövers stattfinden. Diese Zeit wird ebenfalls genutzt um fest-

zustellen, ob der Einsatz des formationsbildenden Manövers überhaupt notwendig ist. Befinden sich alle Fahrzeuge nahe ihrer realen Startposition, kann das Teammanagement des als *Master* eingestuften Systems einen sofortigen Start der Mission einleiten.

Komplexe Manöver mit aktiver Koordination

Komplexe Manöver mit aktiver Koordination finden sich im vorgestellten System u. a. bei Manövern zur Zielverfolgung und Objektsuche. Im Gegensatz zu komplexen Manövern mit passiver Koordination werden implementierte Algorithmen zur Laufzeit eines Manövers auf allen Fahrzeugen ausgeführt, um entsprechend der Missionsaufgabe einen Informationsaustausch oder eine Pfadanpassung zu ermöglichen. Beim Führungskonzept des Fahrzeugverbands wird dabei dennoch ein zentraler Ansatz verfolgt, da lediglich dem als *Master* eingestuften Fahrzeug die Kontrolle zur Berechnung der neuen Pfadabschnitte obliegt. Ein weiterer Unterschied ergibt sich durch die aktive Koordination während der Ausführung, die voraussetzt, dass alle Fahrzeuge die Pfade aller Missionsteilnehmer kennen. Auf dieser Basis ist es möglich, die Vorteile eines koordinierten Fahrzeugverbands innerhalb dynamischer Missionsszenarien zu nutzen. Im weiteren Verlauf soll dies am Beispiel des „Cooperative Line of Sight Target Tracking“ [GSO09] erläutert werden. Der Algorithmus, welcher während der Laufzeit des GREX-Projekts an der Technischen Universität Ilmenau entwickelt wurde, ermöglicht eine richtungsbasierte Zielverfolgung bewegter Objekte und ist für den Einsatz einer akustischen Kommunikationsstrecke konzipiert. Das Ziel ist es, einen Fahrzeugverband zu nutzen, um in einem definierten Gebiet mit Sendern ausgerüstete Fische zu finden und sich diesen zu nähern, um gespeicherte Daten abrufen zu können. Da die Sender in größeren Abständen lediglich ein kurzes akustisches Signal senden, kann ein koordinierter Fahrzeugverband in Formation genutzt werden, um die Position bzw. die Richtung des Zielobjekts über Triangulation/ Trilateration zu bestimmen. Auf dieser Basis erfolgt anschließend eine Modifikation des Missionsplans, welche die Verfolgung eines Objekts ermöglicht. Abbildung 5.19 veranschaulicht dies am Ergebnis einer kurzen Simulation.

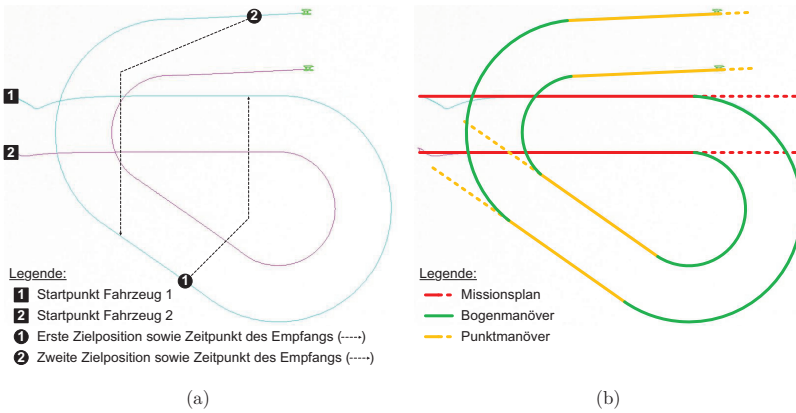


Abbildung 5.18: Simulationsergebnis des Algorithmus zur Zielverfolgung mit zwei Fahrzeugen (a) sowie die Darstellung der relevanten Fahrzeugpfadabschnitte (b)

Wie Abbildung 5.18(b) zeigt, enthält der eigentliche Missionsplan lediglich ein Punktmanöver für beide Fahrzeuge, da die genaue Position und der Weg eines Zielobjekts während der Planung nicht bekannt sind. Während der Ausführung der Mission wird auf Basis eingehender oder berechneter Positionsinformationen der Pfadverlauf geändert, dargestellt durch die grün und gelb gefärbten Pfadabschnitte. Ausgangspunkt der gezeigten Umplanungen sind die in Abbildung 5.18(a) markierten Positionen des Zielobjekts, sowie die gekennzeichneten Zeitpunkte, an denen die jeweilige Information den Fahrzeugen zur Verfügung stand. Liegt eine Positionsinformation vor, prüft das Master-System den Abstand und den Winkel zum Zielobjekt. Erfüllt der daraus resultierende neue Missionspfad den definierten Anforderungen (Mindestabstand zum Ziel, Mindestpfadlänge, Koordinationsstatus, etc.), werden die zum Kurswechsel notwendigen Umplanungen berechnet und an die Managementinstanzen der anderen Fahrzeuge des Verbands gesendet. Die Umplanungssequenz enthält dabei lediglich den Pfad des jeweiligen Fahrzeugs, auf dessen Basis mit Hilfe der definierten Formation die für

die Koordination benötigten Missionspfade aller Fahrzeuge berechnet werden können. Nachdem alle Fahrzeuge die relevanten Umplanungstelegramme erhalten haben, übernehmen die lokalen Managementinstanzen die Umplanung des Manövers. Dies erfolgt in drei Schritten, welche sich in Abbildung 5.18(b) nachvollziehen lassen:

- Reduzierung der Streckenlänge des aktuellen Punktmanövers (Bogenmanöver 2)
- Umplanung des Bogenmanövers 1 entsprechend dem berechneten Bogenmanöver und Befehl zur Ausführung des Bogenmanövers 1 nach dem aktuellen Manöver
- Umplanung des Bogenmanövers 2 entsprechend dem berechneten Punktmanöver

Die berechneten Punktmanöver enden dabei jeweils am Rand des definierten Such- und Verfolgungsgebiets. Bleiben weitere Positionsinformationen aus, endet das Manöver somit sicher an einer definierten Position.

Das in Kapitel 3 beschriebene Missionskonzept wird somit genutzt, um den Nachrichtenaustausch während einer dynamischen Änderung des Pfadverlaufs zu reduzieren und eine kontinuierliche Koordination des Fahrzeugverbands zu erlauben. Ein Pfad kann demnach lediglich durch die Längen der einzelnen Segmente beschrieben werden, insofern, wie im vorliegenden Beispiel, eine bekannte Manöverreihenfolge vorhanden ist. Abbildung 5.19 zeigt die während der Ausführung aufgetretenen Geschwindigkeitsumplanungen zum Erhalt der Formation.

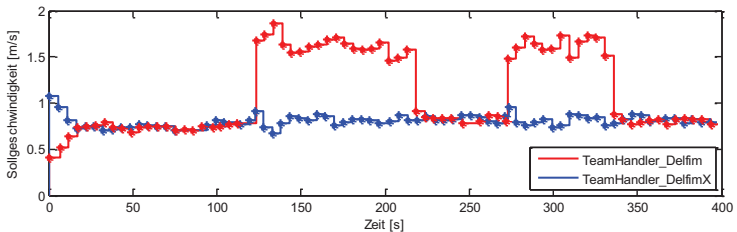


Abbildung 5.19: Geschwindigkeitsanpassungen zum Erhalt der Formation während eines Zielverfolgungsmanövers

5.2.4 Koordination innerhalb gestufter Manöver

Gestufte Manöver stellen eine Sonderform der komplexen Manöver dar und erlauben eine temporäre Auflösung der Formation. Somit ist es möglich, einzelnen Fahrzeuggruppen verschiedene Aufgaben zuzuteilen. Aus Sicht des Teammanagements erfordert dieser Manövertyp neben der Unterstützung mehrerer Fahrzeuggruppen lediglich den in den Abschnitten 5.2.2 und 5.2.3 beschriebenen Funktionsumfang. Anhand eines Simulationsbeispiels, welches in den Abbildungen 5.20 und 5.21 dargestellt ist, wird im weiteren Verlauf die Koordination innerhalb gestufter Manöver beschrieben. Im vorliegenden Beispiel absolviert ein Verband aus drei Fahrzeugen eine Mission, welche ein gestuftes Manöver enthält. Wie Abbildung 5.20(a) zeigt, besteht der erste Teil der Mission aus einem Punktmanöver, welches von allen Fahrzeugen in Koordination abgefahren wird. Nach dem Erreichen des Zielpunktes spaltet sich der Verband in zwei Gruppen auf. Während die ersten beiden Fahrzeuge die koordinierte Pfadverfolgung fortsetzen, wartet *Fahrzeug 3* auf ein definiertes Ereignis, um das für die zweite Gruppe geplante Manöver durchzuführen. Diese Situation ist in Abbildung 5.20(b) dargestellt.

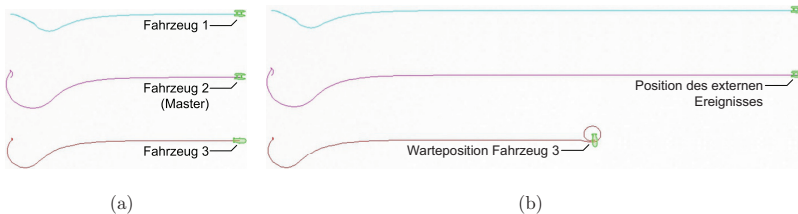
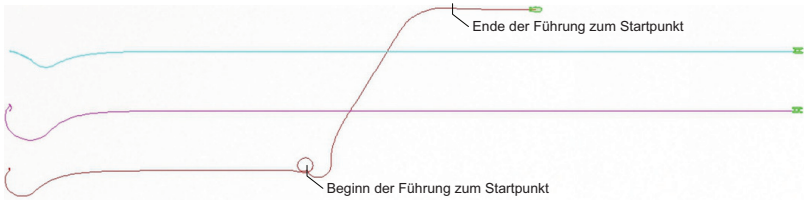


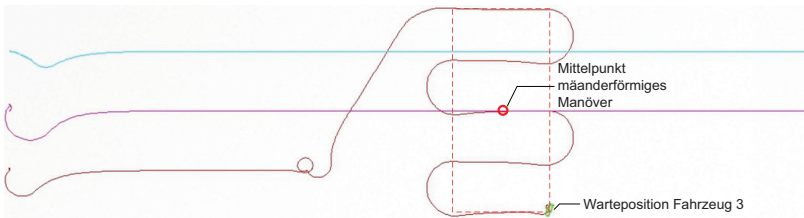
Abbildung 5.20: Beginn der Simulation eines gestuften Manövers mit drei Fahrzeugen

Wird zum Zeitpunkt der in Abbildung 5.20(b) gezeigten Situation das Ereignis zum Start des Manövers der zweiten Gruppe ausgelöst, beginnt das Teammanagement von *Fahrzeug 3* mit der Berechnung der notwendigen Umplanungen. In einem ersten Schritt wird das während der Missionsplanung lediglich relativ geplante Manöver des Fahr-

zeugs mittig auf die aktuelle Position des Master-Systems verschoben. Die notwendigen Positionsänderungen werden dem Fahrzeug über Umplanungsbefehle mitgeteilt. Ist dieser Schritt abgeschlossen, nutzt das Managementsystem den „Go-To-Formation“-Algorithmus [HGP⁺09], um *Fahrzeug 3* an die Startposition des zu absolvierenden Manövers zu führen. Hat das Fahrzeug die entsprechende Startposition erreicht, wird automatisch das umgeplante Manöver ausgeführt. Abbildung 5.21 zeigt diesbezüglich den weiteren Simulationsverlauf.



(a)



(b)

Abbildung 5.21: Verlauf der Simulation eines gestuften Manövers mit drei Fahrzeugen

Im vorliegenden Beispiel absolviert *Fahrzeug 3* ein mäanderrörmiges Manöver. Für den Fall, dass weitere Ereignisse eintreffen, werden diese gespeichert und, insofern relevante Abstände zwischen den Ereignissen liegen, das Manöver an diesen Stellen wiederholt.

5.2.5 Verhalten bei Notsituationen

Da die Fahrzeugsicherheit während einer Mission höchste Priorität besitzt, wird jede Mission unverzüglich abgebrochen sobald ein Befehl des Teammanagements durch ein Fahrzeug abgelehnt wird oder ein Fahrzeug ein Fehlertelegramm sendet. In Einzelfällen wäre das Fortsetzen einer Mission theoretisch möglich, aufgrund der hohen Sicherheitsanforderungen und der fehlenden Erfahrung in diesem Bereich wird dennoch der Abbruch einer Mission eingeleitet, um den Fahrzeugen die Ausführung ihres spezifischen Notprogramms zu ermöglichen.

5.3 Zusammenfassung

Dieses Kapitel beschreibt den Aufbau des entwickelten neuartigen Managementkonzepts für Verbände heterogener maritimer Fahrzeuge. Das vorgestellte zweistufige Beobachtungs- und Umplanungssystem aus Missionsüberwachung und Missionsumplanung nutzt das in Kapitel 3 definierte Missionsdesign, um eine Kooperation unterschiedlicher Fahrzeuge innerhalb komplexer Missionen zu ermöglichen. Die Missionsüberwachung beinhaltet neben den Algorithmen zum Ausführen verschiedener Missionszenarien die Überwachung des Missionsablaufs und generiert die zur Koordination notwendigen Befehle, welche an die Missionsumplanung gesendet und von dieser verarbeitet werden. Die Komplexität der jeweiligen Manöveraufgabe bleibt dabei dem einzelnen Fahrzeug verborgen, da es lediglich auf lokale Befehle des Teammanagements reagieren und den eigenen, aus einem festen Portfolio an Elementen bestehenden Missionsplan verstehen muss. Die Koordination des Verbands übernehmen die im Aufbau identischen Managementinstanzen auf den einzelnen Fahrzeugen, welche sich entsprechend des Missionsplans automatisch zu einem Master-Slave-System konfigurieren. Das entwickelte System übernimmt dabei nicht die Kontrolle der Fahrzeuge, sondern bedient sich den einzelautonomen Fähigkeiten dieser, um eine Kooperation verschiedener Fahrzeuge zu ermöglichen.

6 Umsetzung und Ergebnisse

Um das im Kapitel 5 vorgestellte Teammanagementkonzept umfassend testen zu können, wird eine Simulationsumgebung benötigt, die neben notwendigen – jedoch aufwendigen – realen Seeversuchen eine Validierung und Verbesserung des Systems erlaubt. Dieses Kapitel beschreibt neben dem Softwareentwurf des Teammanagements sowie einer geeigneten Kommunikationsstruktur die Entwicklung einer kompletten Simulationsumgebung. Diese gestattet die Simulation unterschiedlicher Fahrzeuge auf Basis eines parametrisierbaren Fahrzeugmodells innerhalb einer virtuellen Umwelt. Der zweite Teil dieses Kapitels zeigt Ergebnisse verschiedener Simulationen sowie der Seeversuche, welche im Rahmen des GREX-Projekts durchgeführt wurden.

6.1 System- und Softwarearchitektur

6.1.1 Implementierung des Teammanagement-Moduls

Die Softwarestruktur des Teammanagements ist angelehnt an das im Kapitel 5 beschriebene modulare Konzept und verfolgt, wie Abbildung 6.1 zeigt, einen objekt-orientierten Ansatz. Des Weiteren sind die Abhängigkeiten der genutzten Klassenobjekte dargestellt, welche sich in drei Ebenen unterteilen lassen. Die Basisklassen des Teammanagements (rot umrahmt) bilden den Kern der Software und bestimmen den Grundaufbau der abgeleiteten Klassen der Hauptprozess- und Kommunikationsebene.

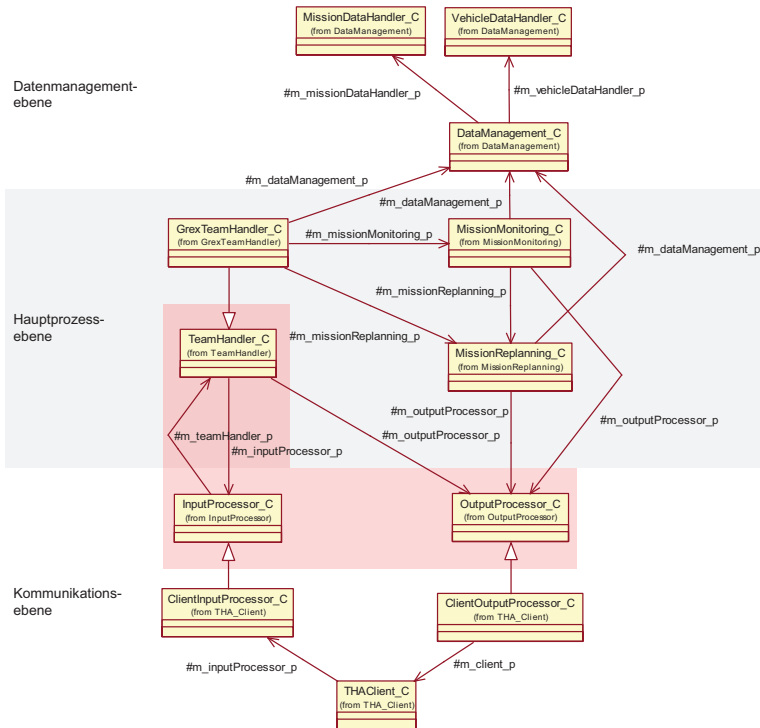


Abbildung 6.1: Klassendiagramm der Teammanagementsoftware

Die gekennzeichneten Basisklassen stellen weiterhin ein Portfolio an grundlegenden Funktionen zur Verfügung, die dem Aufbau eines Teammanagements dienen. Während die Klassen *InputProcessor_C* und *OutputProcessor_C* über die Grundfunktionalitäten zum Senden, Empfangen und Speichern von Daten verfügen, bildet die Klasse *TeamHandler_C* den Rahmen zum Aufbau einer Kontrollinstanz. Auf Basis dieses generischen Ansatzes sind verschiedene Arten der Kommunikation aber auch des Teammanagements ohne großen Aufwand implementierbar. Des Weiteren ist die Kommunikationsebene somit komplett unabhängig vom umgesetzten Managementkonzept.

Aufgrund der hohen Komplexität soll an dieser Stelle keine detailliertere Betrachtung der softwaretechnischen Umsetzung geschehen.

6.1.2 Implementierung der Kommunikationsstruktur

Eine der wesentlichen Voraussetzungen für die Realisierung von Teams autonomer maritimer Fahrzeuge ist der Aufbau einer geeigneten Kommunikationsstruktur. Diese soll nicht nur den Austausch von Steuerbefehlen oder Sensordaten zwischen einzelnen Fahrzeugen ermöglichen, sondern innerhalb der GREX-Systemlösung zusätzlich zur Kommunikation zwischen den einzelnen Modulen eines Fahrzeugs dienen. Die besondere Herausforderung liegt dabei vor allem darin, ein generisches Konzept zu entwerfen, um eine Zusammenarbeit verschiedener Module unterschiedlicher Entwickler zu gewährleisten. Während dieser Arbeit wurde daher in Kooperation mit dem Instituto Superior Técnico eine auf die Bedürfnisse von kooperierenden Systemen angepasste Kommunikationsbibliothek entwickelt, deren Ziel es ist auf Basis einer einfachen und robusten Client-Server-Architektur eine technische Interaktion zu ermöglichen. Weiterhin wurden folgende Gesichtspunkte bei der Entwicklung beachtet:

- Die Kommunikation zwischen verschiedenen Softwaremodulen basiert auf identischen Mechanismen.
- Es soll eine Kommunikation zwischen Softwaremodulen ermöglicht werden, welche auf getrennten Systemen laufen kann.
- Unnötige Komplexität soll vermieden werden.
- Die Systemlast für den Einsatz auf mobilen Systemen minimiert werden.
- Ein Protokollierungssystem soll zu Analysezwecken eingebettet werden.

Wie [AS09] zeigt, wird die Kommunikation dabei in zwei Arten unterschieden. Auf der einen Seite wird durch die Interfahrzeugkommunikation (englisch: inter-vehicle com-

munication, IVC) der Datenaustausch zwischen einzelnen Fahrzeugen realisiert. Wie in Abbildung 6.2 schematisch gezeigt ist, geschieht dies unter Einbeziehung externer Hardware und wird über das Kommunikationsmodul realisiert.

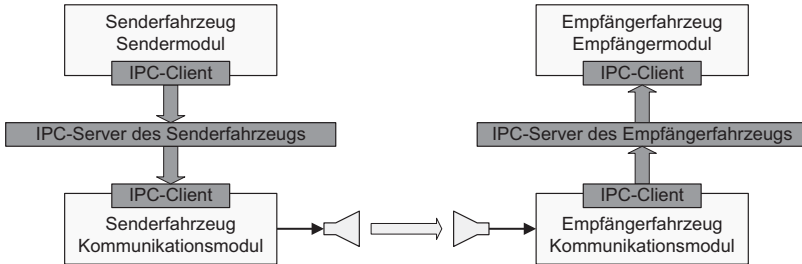


Abbildung 6.2: Implementierung der Interfahrzeugkommunikation (IVC)

Auf der anderen Seite findet sich die Interprozesskommunikation (englisch: inter-process communication, IPC) für den Datenaustausch zwischen Prozessen oder Modulen, welcher hier schwerpunktmäßig betrachtet werden soll. In Abbildung 6.3 ist dahingehend eine schematische Darstellung der Implementierung innerhalb eines GREX-Systems gezeigt.

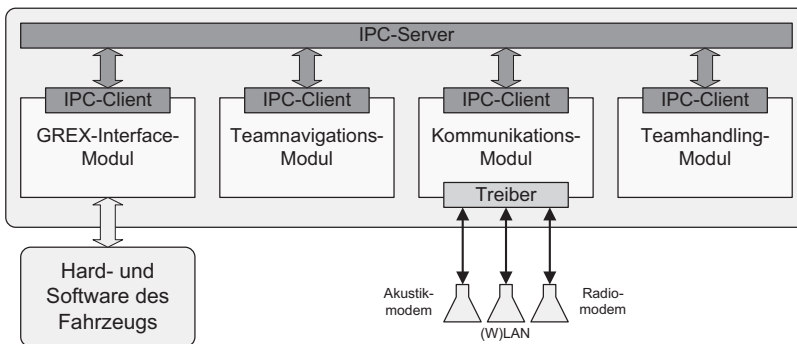


Abbildung 6.3: Implementierung der Interprozesskommunikation (IPC)

Beide Arten nutzen dabei ein auf Identifikationsnummern basierendes Zuordnungssystem, bei dem jedes Fahrzeug und jedes eingesetzte Modul eine eigene eindeutige Kennnummer besitzt. Des Weiteren nutzt die gesamte Kommunikationsstruktur ein umfangreiches Portfolio an definierten Telegrammstrukturen, welche in Tabelle 6.1 dargestellt sind. Dies ermöglicht neben einer effektiven Komprimierung, siehe [ABS09], eine transparente und kontrollierbare Datenübertragung. Somit wird gleichzeitig die Grundlage für eine Kommunikation über Akustik- oder Radiomodems geschaffen.

Tabelle 6.1: *Strukturen für den Datenaustausch innerhalb des GREX-Kommunikationsnetzwerks*

Element	Beschreibung
Fahrzeugnavigationsdaten	Navigationsdaten eines Fahrzeugs (3D Position, 3D Geschwindigkeit, Zeitstempel)
Teamnavigationsdaten	Navigationsdaten des kompletten Verbands basierend auf Fahrzeugnavigationsdaten
Streckendaten	Parameter des aktuellen Streckenabschnitts
Initialisierungsdaten TeamHandling Modul	Datensatz, der die physikalischen Eigenschaften eines Fahrzeugs beschreibt (maximale Geschwindigkeit, Tiefe etc.)
Initialisierungsdaten Teamnavigations-Modul	Datensatz zur Initialisierung des Teamnavigations-Moduls
Entfernungsdaten	Entfernung zwischen zwei Fahrzeugen des Teams
Zielfdaten	Positionsdaten eines Zielobjekts
Anforderungstelegramme	Anforderung bestimmter Datensätze
Aktionstelegramme	Kommandotelegramme für Befehle
Umplanungstelegramme	Datenpaket zum Umplanen von Manövertteilen
Notfalltelegramme	Telegramme für Systemfehler, Abbrüche etc.
Bestätigungstelegramme	Positive oder negative Bestätigung von Befehlen

Eine detaillierte Beschreibung der verschiedenen Datentelegramme findet sich im technischen Report zur Beschreibung der GREX-Systemsprache [Sch09].

Durch die Verwendung definierter Datentelegramme kann jedes Modul, welches den *IPC-Client* nutzt, um innerhalb einer GREX-Systemlösung zu agieren, seine eigenen Datenstrukturen verwenden und ist somit unabhängig vom Aufbau weiterer Module. Die gesamte Funktionalität für das Senden und Empfangen von Nachrichten wird dabei über das Client-Modul zur Verfügung gestellt. Diese Homogenität, welche den generellen Anforderungen geschuldet ist, bietet Entwicklern auf der anderen Seite einen großen Freiraum für flexible Architekturen. Das hier vorgestellte Client-Server-System nutzt dabei Standard TCP/IP Sockets. Nur auf dieser Basis ist dem Server eine zentralisierte Protokollierung der Daten möglich, um zu einem späteren Zeitpunkt eine Mission auszuwerten oder zum Auffinden von Fehlern in der Testphase eines Systems. Der *IPC-Server* selbst ist dabei ein eigenständiges Programm, welches auf die Bedürfnisse mobiler Systeme angepasst ist und lediglich eine minimale Intelligenz besitzt. Er ist somit zuständig für das An- und Abmelden von Modulen, Verwalten einer Liste aktiver Module, Überwachung des Systemzustandes sowie für die Protokollführung. Selbst unter hoher Belastung mit 15 Testmodulen zeigte der Server auf einem Testsystem mit einer Intel® Atom™ N455 CPU keine nennenswerte Systembelastung und eignet sich daher ideal für den Einsatz auf mobilen Systemen mit eingeschränkter Rechenleistung.

Das generische und modulare Konzept, welches bei der Realisierung dieser Kommunikationsbibliothek verfolgt wurde, bietet dabei entscheidende Vorteile bei der Entwicklung und Realisierung von Verbänden autonomer Fahrzeuge. Die variable Struktur ermöglicht es, während der Entwicklungsphase die einzelnen Softwaremodule über ein lokales Netzwerk oder über das Internet in einer virtuellen GREX-Umgebung zu testen oder, sollte ein Fahrzeug über eine permanente Netzwerkverbindung verfügen, Module außerhalb eines Fahrzeugs auf einem separaten PC zu betreiben, um Probleme frühzeitig erkennen zu können. Unabhängig vom Standort sind somit simulative oder reale Tests des Gesamtsystems möglich.

6.2 Simulationsumgebung

6.2.1 Parametrisierbares Fahrzeugmodell

Um während der Entwicklungsphase einen ausgiebigen Test des Teammanagementsystems zu ermöglichen, wurde während dieser Arbeit ein parametrisierbares Fahrzeugmodell auf Basis eines geregelten Fahrzeugverhaltens entwickelt. Wie in [GPZ⁺07] und [SEGO07] gezeigt, wird das dynamische Führungsverhalten eines autonomen maritimen Systems durch Verfahren der theoretischen Prozessanalyse nachgebildet. Abbildung 6.4 zeigt einen Vergleich des konventionellen Modellansatzes mit dem vorgestellten Konzept des geregelten Fahrzeugverhaltens.

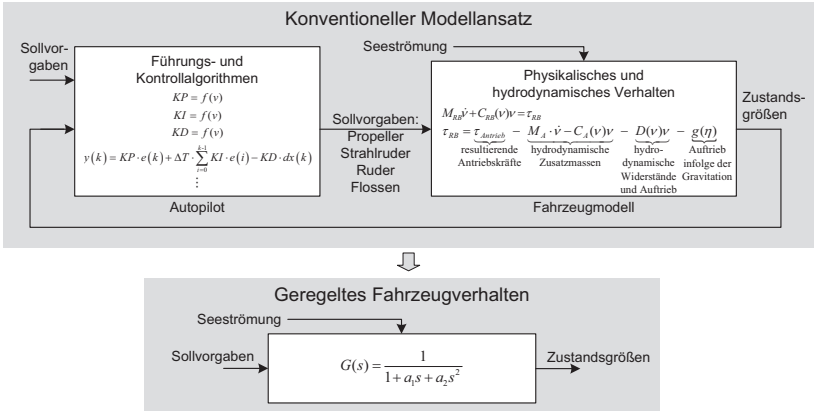


Abbildung 6.4: Modellansätze zur Nachbildung des Führungsverhaltens eines maritimen Fahrzeugs

Wie in Abbildung 6.4 dargestellt, findet beim Modell des geregelten Fahrzeugverhaltens keine separate Betrachtung bzw. Simulation des Autopiloten und des Fahrzeugmodells statt. Die Sollvorgaben des Autopiloten bilden die Eingangsgrößen des Modells, während die Ausgangsgrößen des Modells die Zustandsgrößen (Position, Lage, Geschwin-

digkeit) des Fahrzeugs beinhalten. Das dynamische Fahrzeugverhalten der einzelnen Lage- und Geschwindigkeitsregelungen wird dabei über parametrisierbare Differentialgleichungen nachgebildet [SEGO07].

Die Verwendung des konventionellen Ansatzes erfordert neben den Parametern des physikalischen Fahrzeugmodells die Algorithmen des Autopiloten, die aus Gründen der Geheimhaltung oftmals nicht zur Verfügung stehen. Des Weiteren existieren nicht für alle Fahrzeuge exakte physikalische Beschreibungen. Die Überführung in ein entsprechendes Modell würde, durch notwendige Versuche im Schleppkanal zur Bestimmung der hydrodynamischen Koeffizienten, einen enormen Aufwand bezüglich der Modellidentifikation mit sich führen. Ferner bedeutet die Nutzung des konventionellen Ansatzes einen hohen Zeitaufwand für die Implementierung fahrzeugspezifischer Autopiloten sowie der zugehörigen physikalischen Modelle. Für einen Simulator, der verschiedene Fahrzeugtypen simulieren kann, ist eine derartige Lösung somit nicht realisierbar und unflexibel. Der Ansatz des geregelten Fahrzeugverhaltens bietet eine flexible Alternative, welche zudem sehr einfach integrierbar ist. Neben dem geringen Implementierungsaufwand bieten sich weitere Vorteile, die den Einsatz während einer Entwicklungsphase begünstigen. So können Fahrzeuge simuliert werden, welche sich selbst noch in der Entwicklung befinden oder von denen lediglich die Parameter aus Datenblättern bekannt sind. Die Genauigkeit des verwendeten Ansatzes entspricht dabei den Anforderungen zur Untersuchung des Teamverhaltens mehrerer autonom agierender maritimer Fahrzeuge innerhalb eines komplexen Simulators. Dazu werden die Positionen und die Lage der einzelnen Fahrzeuge in Abhängigkeit ihrer vorgegebenen Sollbahnen und -positionen benötigt unter dem Einfluss äußerer Störfaktoren wie einer Seeströmung. In diesem Zusammenhang zeigt Abbildung 6.5 eine detaillierte Darstellung der Umsetzung des geregelten Fahrzeugverhaltens, die sich in drei Stufen untergliedert. Eine derartige Untergliederung ist notwendig, um die Wechselwirkungen ausreichend genau nachbilden zu können. Die erste Stufe bildet das Aufgabenmanagement, welches aus den aktuellen Manöver- und Navigationsdaten die Abweichung zu den gegebenen Sollwerten berechnet. Diese dienen den Reglern der zweiten Stufe, der Fahrzeugführung, als Eingang. Entsprechend der Eingabewerte berechnen die Regler die Sollvorgaben für

Kurs, Geschwindigkeit und Neigung, welche von den Zustandsreglern der dritten Stufe genutzt werden, um die neue Position und Lage des Fahrzeugs zu bestimmen. Die in der dritten Stufe dargestellten Regler repräsentieren den Kern des parametrisierbaren Fahrzeugmodells und werden durch die fahrzeugspezifischen Vorgaben individuell angepasst. Auf diese Weise ist es möglich, unterschiedliche Fahrzeugtypen zu simulieren.

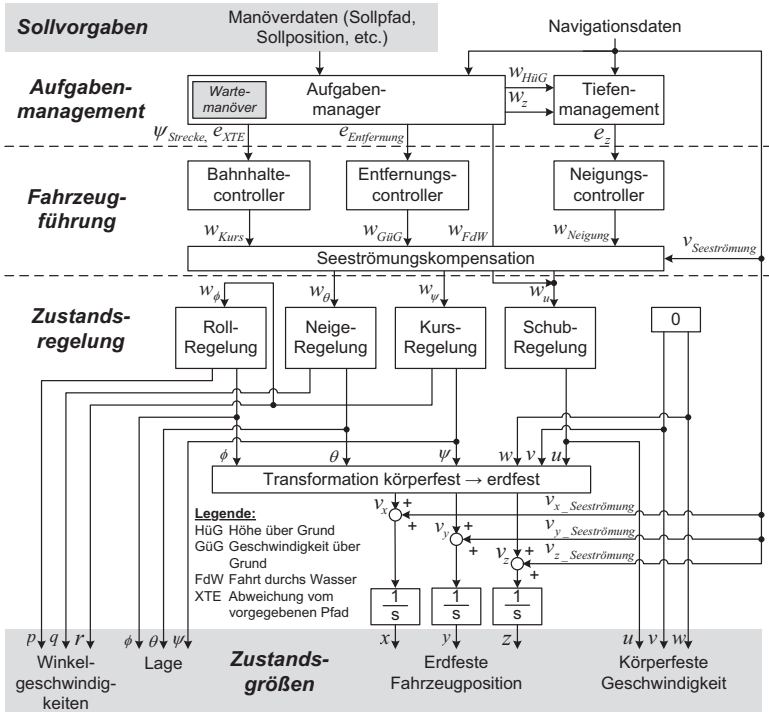


Abbildung 6.5: Schematischer Aufbau des kinematischen Fahrzeugmodells

Um einen Vergleich des konventionellen Ansatzes mit dem geregelten Fahrzeugverhalten zu ermöglichen, wurden verschiedene Manöver mit dem Simulationssystem des Autopiloten des autonomen Unterwasserfahrzeugs M62 [Eic07] und dem an dieses Sys-

tem angepassten geregelten Fahrzeugverhaltens durchgeführt. Abbildung 6.6 zeigt den Aufbau des SIMULINK® Modells des M62 Systems. Im direkten Vergleich dazu zeigt Abbildung 6.7 das zugehörige Modell des geregelten Fahrzeugverhaltens. Deutlich erkennbar ist der Unterschied in der Komplexität der beiden Modelle.

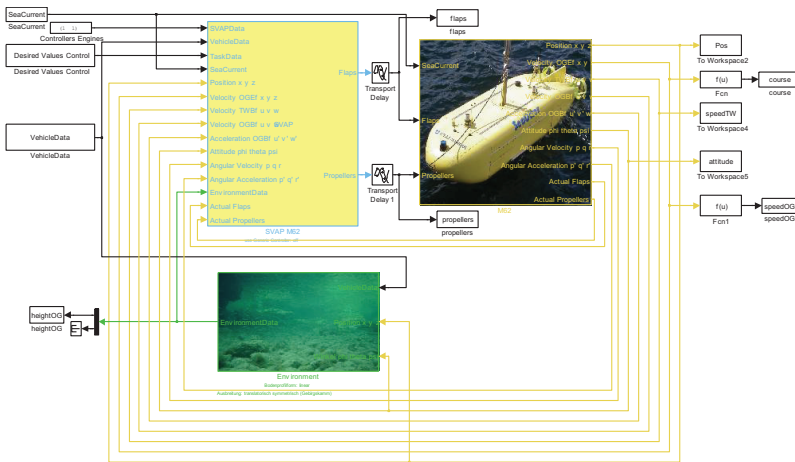


Abbildung 6.6: *SIMULINK[®] System des physikalischen Fahrzeugmodells mit Autopiloten des autonomen Unterwasserfahrzeugs M62 [Eic07]*

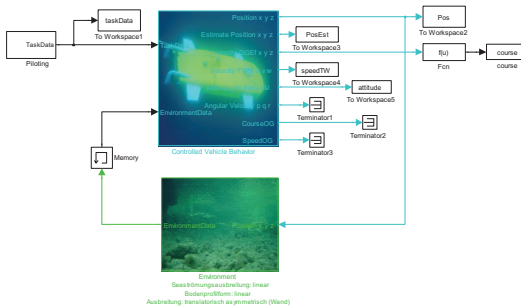


Abbildung 6.7: *SIMULINK[®] System des geregelten Fahrzeugverhaltens*

Weiterhin zeigt Abbildung 6.7, dass es im Vergleich zum konventionellen Ansatz keine Trennung zwischen einem Autopiloten und der Fahrzeugdynamik innerhalb der Simulation gibt. Die Realisierung des geregelten Fahrzeugverhaltens benötigt zudem lediglich 22 Standardparameter wie maximale Geschwindigkeit, maximale Beschleunigung oder die möglichen Winkelgeschwindigkeiten zum Ändern des Kurses. Für das in Abbildung 6.6 gezeigte Modell sind allein für den Autopiloten 162 Parameter notwendig. Hinzu kommen hunderte von Parametern für das physikalische Fahrzeugmodell zur Beschreibung der Antriebe sowie des hydrodynamischen Verhaltens.

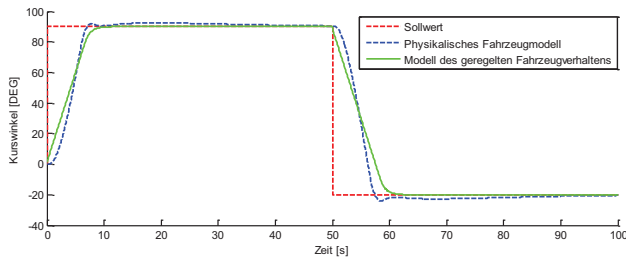


Abbildung 6.8: Vergleich des geregelten Fahrzeugverhaltens mit dem physikalischen Fahrzeugmodell des M62 [Eic07] während eines Kursmanövers

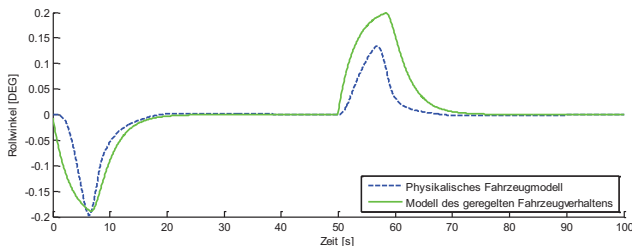


Abbildung 6.9: Vergleich der Rollwinkel des geregelten Fahrzeugverhaltens mit denen des physikalischen Fahrzeugmodells des M62 [Eic07] während des in Abbildung 6.8 dargestellten Kursmanövers

Abbildung 6.8 zeigt das Verhalten beider Modellansätze während eines einfachen Kursmanövers. Die während des Kursmanövers anliegenden Rollwinkel sind in Abbildung 6.9 dargestellt. Die Abbildungen 6.10 und 6.11 betrachten das Verhalten beider Modellansätze während eines Tauch- und Geschwindigkeitsmanövers im Vergleich zu den Sollvorgaben.

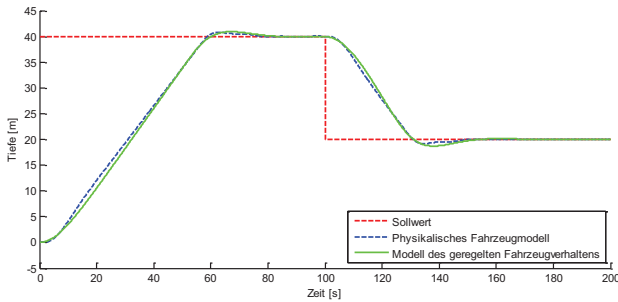


Abbildung 6.10: Vergleich des geregelten Fahrzeugverhaltens mit dem physikalischen Fahrzeugmodell des M62 [Eic07] während eines Tauchmanövers

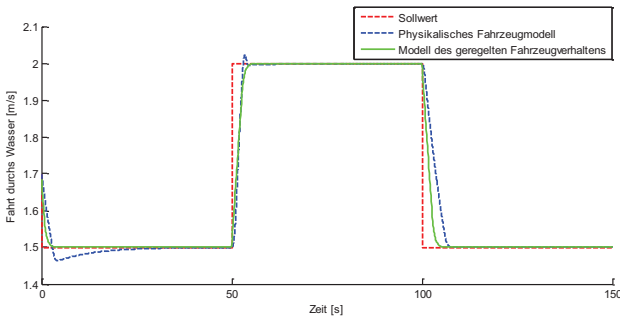


Abbildung 6.11: Vergleich des geregelten Fahrzeugverhaltens mit dem physikalischen Fahrzeugmodell des M62 [Eic07] während eines Geschwindigkeitsmanövers

Abbildung 6.12 ermöglicht einen Vergleich der resultierenden Fahrzeugtrajektorien bei der Ansätze während der Simulation eines mäanderförmigen Manövers.

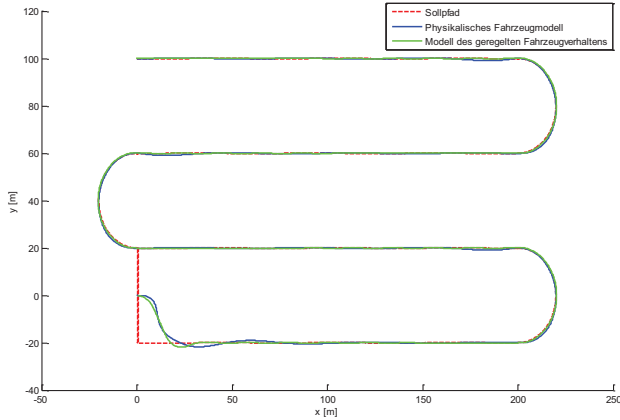


Abbildung 6.12: Vergleich der Fahrzeugtrajektorie des geregelten Fahrzeugverhaltens mit der des physikalischen Fahrzeugmodells des M62 [Eic07] während eines mäanderförmigen Manövers

Zusammenfassend ist festzustellen, dass das entwickelte Simulationsmodell das Verhalten eines an einem realen Fahrzeug validierten physikalischen Modells ausreichend genau approximieren kann. Somit zeigen die Kurvenverläufe des geregelten Fahrzeugverhaltens für die präsentierten Szenarien eine gute Näherung an die Verläufe des physikalischen Fahrzeugmodells. Die aufgezeigten Abweichungen, welche vor allem beim Vergleich der Rollwinkel beider Modellansätze während des Kursmanövers (siehe Abbildung 6.9) zum Tragen kommen, sind an dieser Stelle vernachlässigbar und besitzen keinen negativen Einfluss auf das Simulationskonzept, da es nicht um eine exakte Nachbildung des physikalischen Fahrzeugverhaltens geht. Dadurch bietet das geregelte Fahrzeugverhalten eine ausreichende genaue Abbildung der Realität, um verschiedene Fahrzeugtypen innerhalb eines Simulators zu repräsentieren und den umfangreichen

Test des Teammanagementsystems zu ermöglichen. Weiterhin war der konventionelle Ansatz während der Simulation der vorgestellten Testszenarien im Schnitt 15-mal langsamer, wodurch der Unterschied des Rechenaufwands beider Ansätze deutlich erkennbar ist.

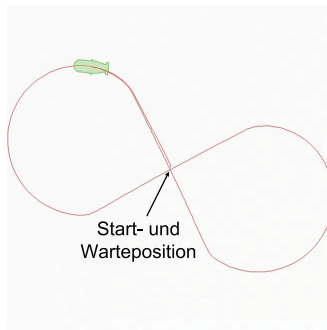
Da, wie in Unterabschnitt 5.2.1 bereits beschrieben, das Halten einer Position im maritimen Bereich nach wie vor eine große Herausforderung darstellt, nutzen viele Hersteller ein Ersatzmanöver, um diese Aufgabe zu erfüllen. Die beiden am häufigsten verwendeten Typen sind als konfigurierbare Wartemanöver im Aufgabenmanager hinterlegt. Somit ist es möglich, den Einfluss der spezifischen Realisierungen im Manöververlauf zu betrachten. Abbildung 6.13 zeigt die in der Implementierung umgesetzten Arten der Wartemanöver durch ein simuliertes Fahrzeug.



(a) Hovermanöver



(b) Kreismanöver



(c) Schleifenmanöver

Abbildung 6.13: Halten einer vorgegebenen Position durch ein simuliertes Fahrzeug auf Basis eines Ersatzmanövers

Je nach Art des Fahrzeugs kann der benötigte Bereich zum Halten einer Position eine Ausdehnung von mehr als 30 m erreichen und hat dadurch Auswirkungen auf die Missionsgestaltung und bestimmte Algorithmen wie den „Go-To-Formation“-Algorithmus [HGP⁺09]. In Abbildung 6.13(a) ist das Fahrzeug in der Lage, die Position aktiv zu halten und sich anhand der anliegenden Strömung auszurichten. Abhängig von einer Strömungsänderung oder der initialen Ausrichtung des Fahrzeugs geschieht dies, wie dargestellt, erst nach dem Erreichen einer bestimmten Regelabweichung. Eine harte Regelung wäre aufgrund der sich ständig ändernden Umweltbedingungen sehr ineffektiv. Dem gegenüber stehen die verfügbaren Ersatzmanöver zum Halten einer definierten Position, welche in den Abbildungen 6.13(b) und 6.13(c) gezeigt werden. Das Fahrzeug beginnt somit sofort nach dem Start, entsprechend des aktuellen Kurses, mit dem Wartemanöver, um die gegebene Position mittig zu umkreisen bzw. zu kreuzen. Vor allem für autonome Unterwasserfahrzeuge ohne vertikale Strahlruder, ist dies die einzige Möglichkeit in einer definierten Tiefe eine Position zu halten.

6.2.2 Umweltsimulation

Um die Simulation von Teams heterogener maritimer Fahrzeuge unter realitätsnahen Bedingungen zu ermöglichen, wurde während dieser Arbeit eine simulierte Umwelt entwickelt. Diese stellt alle benötigten Umweltdaten zu Verfügung und ist somit in der Lage verschiedene Fahrzeugsensorik zu simulieren. Abbildung 6.14 zeigt das Klassendiagramm der Software und verdeutlicht den modularen sowie in drei Ebenen gegliederten Ansatz der Umsetzung. Die oberste Ebene beinhaltet die gesamte Funktionalität der simulierten Umwelt. So ermöglicht die Klasse *SeaBottom_C* das Einbinden von bildbasierten Tiefenkarten oder die Angabe eines statischen Tiefenwerts, wodurch der Speicher- und Rechenbedarf gesenkt werden kann. Das eingebettete Strömungsmodell, realisiert innerhalb der Klasse *SeaCurrent_C*, basiert auf einer dreidimensionalen Matrix, welche für ein vorgegebenes Raster die Strömungswerte für alle Kartensektoren bereitstellt. Diese können zusätzlich zyklisch variiert werden.

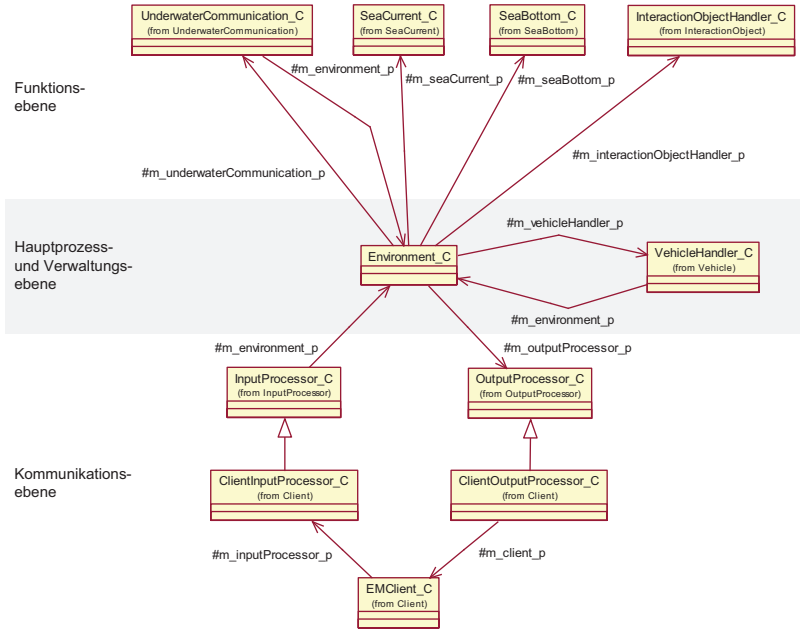


Abbildung 6.14: Klassendiagramm der Umweltsimulationssoftware

Neben den Modulen für die Simulation eines Seebodens und einer Seeströmung findet sich die Realisierung einer vereinfachten Unterwasserkommunikation (*UnderwaterCommunication_C*) auf Basis akustischer Modems. Da die mittlere Schallgeschwindigkeit unter Wasser bekannt ist, können Nachrichten zwischen verschiedenen Fahrzeugen entsprechend ihrer Entfernung zueinander simulativ verzögert werden, wenn sich mindestens eins der beiden Systeme unter Wasser befindet. Weiterhin kann durch die Angabe einer Fehlerrate der Ausfall oder eine extreme Verzögerung von Nachrichten simuliert werden. Eine Betrachtung modemspezifischer Eigenschaften, der Ausbreitungscharakteristik von Schallwellen unter Wasser sowie der Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit vom Salzgehalt des Wassers werden an dieser Stelle vernachlässigt.

Weiterhin bietet die Simulationsumgebung die Möglichkeit Objekte einzubinden (*InteractionObjectHandler_C*), die z. B. für den Test von Ausweich- oder Suchalgorithmen genutzt werden können. Die Komplexität der einzelnen Teilbereiche beschränkt sich dabei auf die Anforderungen zur Untersuchung des Teamverhaltens kooperiert agierender heterogener Fahrzeuge. Auf die Implementierung physikalischer Modelle sowie realer See- und Strömungskarten wurde daher verzichtet. Der objektorientierte Ansatz bietet jedoch alle Voraussetzungen, um diese nachträglich einzubinden.

Die zweite Ebene der in Abbildung 6.14 dargestellten Softwareumsetzung beinhaltet den Hauptprozess sowie die notwendigen Strukturen zum Verwalten angemeldeter Fahrzeuge. Die Realisierung eines Datenaustauschs erfolgt über die *Kommunikationsebene*, welche in der vorgestellten Implementierung die im Unterabschnitt 6.1.2 präsentierte Kommunikationsbibliothek nutzt. Auf diese Weise kann die entwickelte Software auf einem separaten PC ausgeführt werden, wodurch rechenintensive Simulationen ausgelagert werden können.

6.3 Simulativer Test des Gesamtsystems

Basierend auf der im Abschnitt 6.2 vorgestellten Simulationsumgebung ist ein Test der realen GREX-Softwaremodule und somit auch des entwickelten Planungs- und Managementsystems unter realitätsnahen Bedingungen möglich. Abbildung 6.15 verdeutlicht den Aufbau der Simulation am Beispiel eines Fahrzeugs. Diese besteht neben den realen GREX-Systemmodulen aus einem simulierten Fahrzeug und der simulierten Umwelt. Die Kommunikation zwischen den einzelnen Teilbereichen und Modulen beruht auf der in Unterabschnitt 6.1.2 vorgestellten socketbasierten Client-Server-Realisierung, wodurch die einzelnen Teile der Simulation auf unterschiedliche Systeme ausgelagert werden können. Eine Simulation ist somit nicht ortsgebunden und kann über das Internet stattfinden. Des Weiteren zeigt Abbildung 6.15 alle notwendigen Kommunikationspfade mit den relevanten Nachrichtentypen unter Verwendung der jeweiligen Originalnotation (siehe [Sch09]).



Der Aufbau einer Simulation mit mehreren Fahrzeugen ist schematisch in Abbildung 6.16 dargestellt.

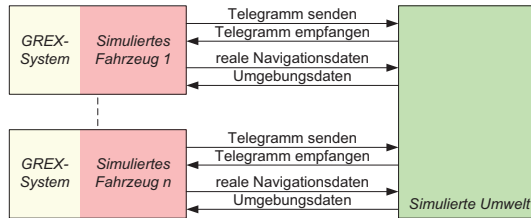


Abbildung 6.16: Struktur der Gesamtsimulation mehrerer Fahrzeuge

Auf Basis des vorgestellten Simulationssystems zeigt Abbildung 6.17 beispielhaft den Auszug einer simulierten Zielverfolgung mit 3 Fahrzeugen bei einer Missionsgeschwindigkeit von 0.5 m/s. Die gewählte Mission enthält einen Großteil der während des GREX-Projekts umgesetzten Algorithmen sowie Manövertypen und bietet damit einen repräsentativen Ausschnitt der Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems.

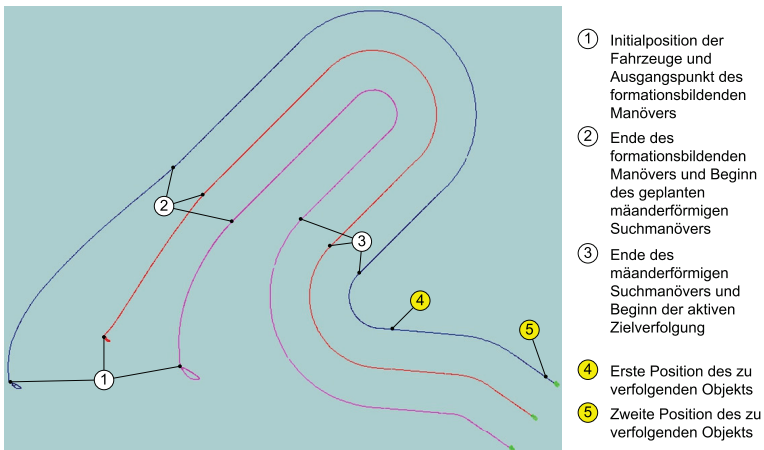


Abbildung 6.17: Simulation einer Zielverfolgung mit drei Fahrzeugen

Nach Abschluss des formationsbildenden Manövers beginnt der Fahrzeugverband mit dem mäanderförmigen Suchmanöver den aktiv koordinierten Teil der Mission. Ist eine Zielposition bekannt, wird das Suchmanöver abgebrochen und durch die Pfadplanung der aktiven Zielverfolgung ersetzt.

Die zum Erhalt der Formation notwendigen Umplanungen sind in Abbildung 6.18 dargestellt und zeigen in den Abschnitten der Bogenmanöver markante Änderungen in den Geschwindigkeiten der einzelnen Fahrzeuge. Diese sind durch die unterschiedlichen Pfadlängen zu erklären, wodurch Fahrzeuge auf der Außenbahn eines Bogenmanövers schneller fahren müssen, um eine definierte Formation aufrecht zu halten. Während der geraden Streckenabschnitte zeigen sich lediglich geringe Unterschiede zur definierten Missionsgeschwindigkeit von 0.5 m/s. An dieser Stelle gilt es zu beachten, dass die Missionspfade und somit die Grundlage der Formationserhaltung nach dem Beenden des mäanderförmigen Suchmanövers (bei ca. 450 s) nicht vorab geplant, sondern durch das Teammanagement des Fahrzeugs Delfim berechnet und anschließend an die Fahrzeuge Seabee und DelfimX gesendet wurden. Somit ist gezeigt, dass die Formationserhaltung auf Basis definierter Pfade in dynamischen Manövern anwendbar ist.

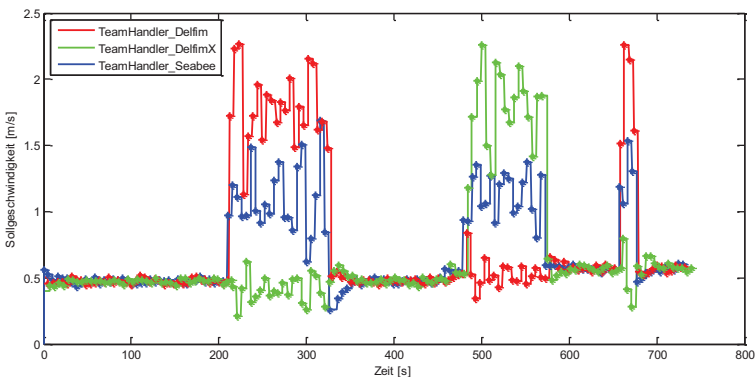


Abbildung 6.18: Geschwindigkeitsumplanungen zum Erhalt der Formation während der Simulation einer Zielverfolgung mit drei Fahrzeugen

Abbildung 6.19 zeigt über den Verlauf der beschriebenen Mission die mittlere Abweichung aller Fahrzeuge von der definierten Formation. Deutlich zu erkennen sind die erhöhten Abweichungen während der Bogensegmente. Da die Geschwindigkeitsanpassungen nur in festen Zeitabständen möglich sind (in der Regel 5 s), ändern sich bei größeren Geschwindigkeitsunterschieden die Abstände zwischen den Fahrzeugen wesentlich schneller als bei einer identischen Geschwindigkeitsbasis. Die Stellgrößenänderung durch den implementierten Regler ist daher größer, was in Kombination mit der Trägheit der Systeme zu den dargestellten Unterschieden führt.

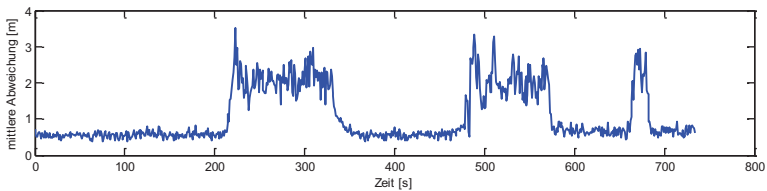


Abbildung 6.19: *Mittlere Abweichung von einer definierten Formation über den Verlauf eines Zielverfolgungsmanövers mit drei Fahrzeugen*

6.4 Seetests

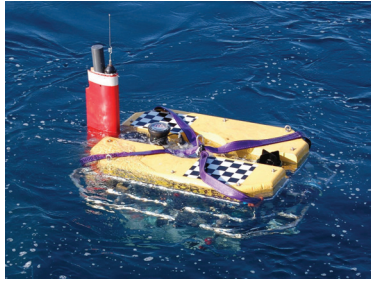
Neben den simulativen Tests des vorgestellten Systems wurde es zusätzlich in zahlreichen Seetests geprüft und verbessert. Die folgende Aufzählung nennt die wichtigsten Termine und Orte:

- 21.07. bis 04.08.2008 – Horta, Azoren
- 11.11. bis 21.11.2008 – Toulon, Frankreich
- 03.09. bis 10.09.2009 – Toulon, Frankreich
- 26.10. bis 06.11.2009 – Sesimbra, Portugal (finale Seeveruche)

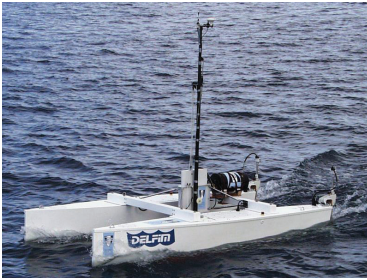
Dabei konnte das während dieser Arbeit entwickelte Konzept auf vier bestehenden heterogenen Systemen implementiert und getestet werden. Abbildung 6.20 zeigt diese Fahrzeuge von insgesamt drei unterschiedlichen Institutionen.



(a) SeaBee (ATLAS Elektronik, Bremen)



(b) Vortex (Ifremer, Toulon)



(c) Delfim (IST, Lissabon)



(d) DelfimX (IST, Lissabon)

Abbildung 6.20: Während der Seeversuche eingesetzte heterogene Testsysteme

Als Ergebnis der finalen Seeversuche im November 2009 wurde die Funktions- und Leistungsfähigkeit des Planungs- und Managementsystems in verschiedenen, im Bereich von Verbänden heterogener maritimer Fahrzeuge neuartiger, Missionsszenarien bestätigt. So wurden Missionen zur koordinierten Pfadverfolgung mit bis zu vier Fahrzeugen erfolgreich absolviert. Abbildung 6.21 zeigt diesbezüglich eine Aufnahme während einer Mission mit drei Fahrzeugen.



Abbildung 6.21: *Koordinierte Pfadverfolgung mit drei Fahrzeugen in einer Dreiecksformation*

Weiterhin konnte auf Basis zweier Fahrzeuge (Delfim und DelfimX) und unter Verwendung einer akustischen Unterwasserkommunikation eine koordinierte Zielverfolgung realisiert werden. Abbildung 6.22 zeigt einen Ausschnitt dieser Mission mit den Pfadverläufen der Fahrzeuge sowie dem Pfadverlauf des als Rechteck dargestellten Zielobjekts.

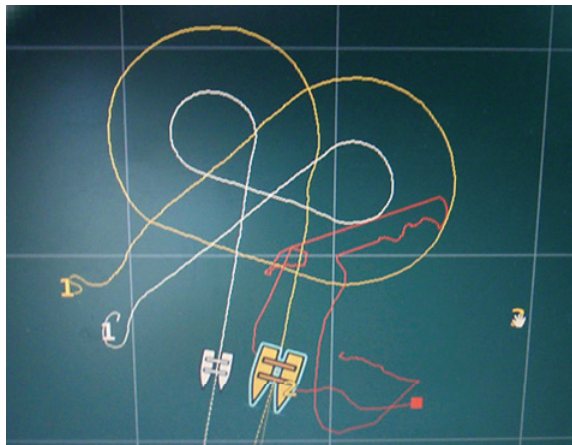


Abbildung 6.22: *Zielverfolgung mit zwei koordiniert agierenden Fahrzeugen*

6.5 Zusammenfassung

Neben der Darstellung der objektorientierten Implementierung des in Kapitel 5 beschriebenen Teammanagementsystems wird die Realisierung einer Kommunikationsbibliothek vorgestellt. Diese ermöglicht eine prozessunabhängige Kommunikation zwischen verschiedenen Softwaremodulen und somit, neben der Kommunikation innerhalb der realen GREX-Systemlösung sowie zwischen einzelnen Fahrzeugen, den Aufbau einer Simulation.

Die während dieser Arbeit realisierte Simulationsumgebung ist in der Lage, einen kompletten Fahrzeugverband in einer virtuellen Umwelt zu simulieren. Basierend auf dem neuartigen Ansatz eines parametrisierbaren Fahrzeugmodells wird ein geregeltes Fahrzeugverhalten genutzt, um durch wenige Parameter flexibel verschiedene Fahrzeugtypen zu repräsentieren. Der Einsatz von hoch genauen und aufwendigen physikalischen Modellen ist daher nicht notwendig, wodurch der Rechen- und Implementierungsaufwand sehr gering gehalten wird. Den zweiten Teil der Simulationsumgebung bildet eine simulierte Umwelt. Diese ist in der Lage, verschiedenen Fahrzeugen alle notwendigen Daten wie eine Seeströmung oder Tiefe in Abhängigkeit ihrer Position zu liefern und bildet damit die Grundvoraussetzung für eine realitätsnahe Simulation des vorgestellten Teammanagementsystems.

Ausgiebige Seeversuche bestätigten die Funktionsweise des entwickelten Teammanagementkonzepts innerhalb der GREX-Systemlösung, der Missionsplanung sowie der realisierten Kommunikationsstrukturen. Des Weiteren wurden die Ergebnisse der zahlreichen Simulationen verifiziert, wodurch die Leistungsfähigkeit des entwickelten Gesamtkonzepts ersichtlich ist.

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

Das zunehmende Interesse an der Erforschung und Industrialisierung der Ozeane fördert den Einsatz unbemannter Robotersysteme, welche selbstständig Missionen erfüllen oder vom Menschen ferngesteuert werden. Um komplexe Missionsszenarien realisieren zu können – aber auch die Einsatzzeit und die damit verbundenen Kosten zu senken – sind kooperierende Verbände autonomer Systeme notwendig. Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen des europäischen Forschungsprojekts GREX realisiert, welches sich als eines der ersten Projekte überhaupt mit der Führung und Koordination unterschiedlicher autonomer maritimer Fahrzeuge beschäftigt. Auf dieser Basis entstand während dieser Arbeit ein neuartiges und umfassendes Konzept zur Planung und zum Management von Verbänden heterogener maritimer Systeme.

Ein mehrstufiges Missionsdesign bildet die Grundlage des vorgestellten Planungs- und Managementkonzepts, als Resultat einer Fähigkeitsanalyse bestehender autonomer maritimer Systeme, Gesprächen mit Fahrzeugbetreibern sowie den Anforderungen der GREX-Missionsszenarien. Die erste Stufe wird durch ein flexibel erweiterbares Portfolio an Missionselementen für Verbände von Fahrzeugen in einer Metasprache auf Teamebene repräsentiert. Das Vokabular dieser Missionselemente ist beliebig erweiterbar, muss jedoch in das konstante Vokabular der Elemente für Einzelfahrzeuge übersetzbar sein, welches die zweite Stufe des Missionsdesigns darstellt. Auf dieser Grundlage

ist eine einfache Überführung in die dritte Stufe, der Missionssprache der jeweiligen Fahrzeuge, realisierbar. Somit kann trotz der verschiedenen Anforderungen der Fahrzeughersteller und -betreiber eine flexible Missionsplanung erreicht werden.

Um einem Anwender die Möglichkeit zu bieten, Missionen für Fahrzeugverbände ohne genaue Kenntnis der komplexen Missionssprache sowie der Anforderungen der einzelnen Fahrzeuge planen zu können, wurde eine softwaregestützte Missionsplanung entwickelt. In einem automatisierten und für den Nutzer unsichtbaren Prozess werden die Fähigkeiten der ausgewählten Fahrzeuge geprüft und die parametrisierbaren Objekte der Planungsoberfläche entsprechend angepasst. Weiterhin garantiert die Software einen Missionsaufbau entsprechend der festgelegten Definition und minimiert das Fehlerpotential während der Planungsphase. Neben der softwaregestützten Missionsplanung wird ein neuartiges Konzept zum formationsorientierten Ausweichen bekannter Objekte vorgestellt, welches in einem zusätzlichen Planungsschritt durchgeführt werden kann. Auf Basis diskretisierter Hindernisse wird ein modifizierter Graph eingesetzt, um den kürzesten, durch einen in Formation befindlichen Verband, befahrbaren Missionspfad zu ermitteln und die Objekte kollisionsfrei zu umfahren.

Den Schwerpunkt dieser Arbeit bildet das entwickelte Managementsystem für Verbände heterogener maritimer Fahrzeuge. Auf Basis eines zweistufigen Beobachtungs- und Umplanungssystems sowie der vorgestellten Missionssprache wird somit erstmals die Möglichkeit geschaffen, verschiedene einzelautonome Systeme kooperiert einsetzen zu können. Das Teammanagement übernimmt dabei nicht die Kontrolle der Fahrzeuge sondern nutzt, über definierte Befehle, lediglich die einzelautonomen Fähigkeiten dieser, um eine Kooperation in verschiedenen Szenarien zu realisieren. Eine genaue Kenntnis der Fahrzeugsteuerung oder eine Änderung der Fahrzeughardware sind daher nicht notwendig. Ein weiterer Vorteil des entwickelten Managementsystems zeigt sich in der Handhabung der komplexen Teammissionsstrukturen. Die Komplexität einer Manöveraufgabe beschränkt sich dabei auf die Ebenen des Teammanagements und wird nicht an die Fahrzeuge weitergegeben. Auf der Basis eines konstanten Befehlsportfolios sind somit beliebig komplexe Szenarien realisierbar. Weiterhin erfordert der Entwurf neuer Teammanöver dadurch keine Modifikation der fahrzeugeigenen Hard- und Software.

Um unabhängig von kostenintensiven Seeversuchen realitätsnahe Tests des entwickelten Management- und Planungssystems zu ermöglichen, wurde während dieser Arbeit eine komplette Simulationsumgebung realisiert. Basierend auf dem neuartigen Ansatz eines parametrisierbaren Fahrzeugmodells können unterschiedliche Fahrzeugtypen auf Grundlage weniger Parameter ausreichend genau simuliert werden. Die Nutzung und Implementierung detaillierter physikalischer Modelle ist somit nicht notwendig. Eine virtuelle Umwelt bildet den zweiten Teil der Simulationsumgebung. Auf Basis verschiedener Module zur Nachbildung einer Seeströmung oder eines Seebodens versorgt diese die simulierten Fahrzeuge mit allen für eine Steuerung notwendigen Sensordaten.

Das während dieser Arbeit entwickelte Gesamtkonzept, welches neben der softwaregestützten Missionsplanung das Teammanagement, die Kommunikationsbibliothek zur Interprozesskommunikation sowie eine komplette Simulationsumgebung enthält, wurde in zahlreichen simulativen Tests validiert und kontinuierlich verbessert. Die Leistungsfähigkeit des vorgestellten Konzepts wurde zudem in mehreren realen Seeversuchen unter Beweis gestellt, wobei das entwickelte Teammanagement- und Kommunikationssystem auf vier heterogenen maritimen Systemen implementiert und erfolgreich innerhalb verschiedener Szenarien getestet wurde. Des Weiteren bestätigt sich dadurch das Potential der Missionsplanung und -sprache, welche sowohl für die Simulationen als auch für die Seeveruche genutzt wurden.

7.2 Ausblick

Die vorliegende Arbeit bietet auf dem Gebiet der Koordination von Verbänden heterogener maritimer Fahrzeuge einen neuartigen Ansatz, welcher als Grundlage für weitere Forschungsaktivitäten dienen wird. Diese sind jedoch vor allem an die Entwicklung hochgenauer Navigationstechniken im Unterwasserbereich sowie sicherer und breitbandfähiger Techniken für die Unterwasserkommunikation gebunden. Nur auf diesem Weg ist es möglich, bestehende Systeme flexibel zu nutzen, Missionsszenarien kom-

plexer zu gestalten und eine dynamische Missionsstruktur (wie z. B. in [Pfü04] vorgestellt) zu realisieren. Eine interaktive Zusammenarbeit mehrerer Systeme ist somit denkbar, welche, wie [GMJ11] und [MZJ11] zeigen, derzeit vor allem für Landroboter einen Forschungsschwerpunkt darstellt. Weiterhin kann das präsentierte Simulationssystem für die Entwicklung und Erprobung neuer Algorithmen sowie für Machbarkeitsstudien im maritimen Bereich genutzt werden. Kostenintensive Seeveruche sind somit in den Anfangsphasen nicht notwendig oder können stark reduziert werden. In diesem Zusammenhang sollte eine Erweiterung und Überprüfung der Umweltsimulation stattfinden, welche im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich war, um durch die Integration validierter Konzentrations- und Strömungsmodelle realitätsnahe Simulationen komplexer Manöver zu ermöglichen. Grundsätzlich ist eine Übertragung des Planungs- und Managementsystems in andere Bereiche wie der Luft- und Landrobotik ohne Weiteres möglich. Daher ist für zukünftige Arbeiten eine Kopplung verschiedener Systeme zu untersuchen. So sind Szenarien denkbar, die eine Kooperation von heterogenen maritimen Systemen und heterogenen Flugsystemen beinhalten. Die größere Kommunikations- und Aufklärungsreichweite der Flugsysteme bietet eine gute Grundlage zur Erweiterung des entwickelten Konzepts. In diesem Zusammenhang ist zu untersuchen, ob der vorgestellte Algorithmus für die Hindernisvermeidung eines in Formation befindlichen Fahrzeugverbands während der Laufzeit einer Mission eingesetzt werden kann, da Hindernisse somit frühzeitig detektierbar sind.

ATLAS Elektronik UK prüft derzeit den industriellen Einsatz des vorgestellten Planungs- und Managementsystems als Teil der GREX-Systemlösung für die Entschärfung von Minenfeldern. Das Einsatzszenario sieht vor, dass sich eine Gruppe leichter Boote (Inflatable) direkt in ein Minenfeld bewegt. Alle Fahrzeuge sind mit Magnetspulen ausgerüstet und simulieren dadurch die Signatur eines großen Schiffs, wodurch Influenz-Minen (Magnetminen) ausgelöst werden. Die Boote sind so konstruiert, dass sie eine derartige Detonation unbeschadet überstehen. Durch Formationsfahrten mit Hilfe des vorgestellten Systems können verschiedene Simulationen oder eine größere Suchleistung erreicht werden.

A Beispielmmissionen

Dieses Kapitel zeigt Beispiele von Team- und Einzelmissionsplänen auf Basis verschiedener Manövertypen. Zum besseren Verständnis werden lediglich kartesische Koordinaten verwendet. Weiterhin ist die Anzahl der Fahrzeuge auf zwei beschränkt unter Verwendung identischer Startkoordinaten für alle Missionen. Als Grundlage der Planung dient der in Abbildung A.1 dargestellte georeferenzierte Kartenausschnitt. Abbildung A.1 zeigt zusätzlich den für die Planung genutzten *Missionsbereich* sowie die Position der *geodätischen Referenzkoordinate*.

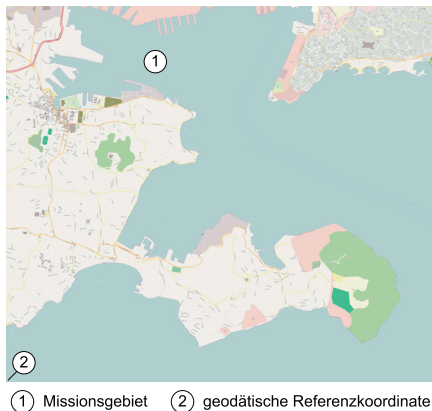


Abbildung A.1: Georeferenzierter Kartenausschnitt des Hafengebiets der Stadt Toulon, Frankreich ©OpenStreetMap und Mitwirkende, CC-BY-SA [OSM06]

A.1 Missionsplan mit Basismanövern

Abbildung A.2 zeigt einen Missionsplan, basierend auf zwei Punktmanövern, welche durch ein halbkreisförmiges Bogenmanöver miteinander verbunden sind.

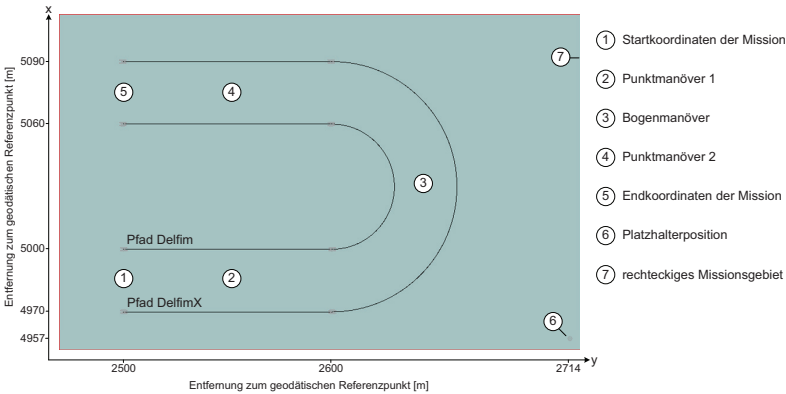


Abbildung A.2: Teammissionsplan mit Basismanövern

A.1.1 Teammissionsplan

Die einzelnen Elemente der Mission sind in Abbildung A.2 gekennzeichnet. Entsprechend der Anzahl der Fahrzeuge, der Definition des Missionsgebiets und der Festlegung der Platzhalterposition ergibt sich der folgende Kopfteil innerhalb des zugehörigen Teammissionsplans:

```
1.4,CART,43.0607827614794,5.8721736846899
#VEHICLE,1,3,Delfim,Delfim,delfim.xml
#VEHICLE,2,4,DelfimX,DelfimX,delfimx.xml
#MISSIONCONSTRAINTS,3,0,{5032.16,2594.46,161.174,250.218,0},300,3600
#PLACEHOLDER,4,4956.88,2714.22
```

```
#M_INIT,5,1.5
```

Da zu Beginn einer Mission ein formationsbildendes Manöver benötigt wird, findet sich im weiteren Verlauf das Missionselement *M_GOTOFORMATION*. Es enthält neben dem Sollkurs der Fahrzeuge, in diesem Fall 90°, den Aufbau der Formation und die Startpositionen der beiden Fahrzeuge in den Zeilen mit den Nebenelementnummern 0, für Delfim, und 1, für DelfimX.

```
#M_GOTOFORMATION,6,{0,1},90,{-30,0,0}
0,,5000,2500,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
1,,4970,2500,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
```

Weiterhin wird durch die Angabe der Prioritätsliste mit $\{0,1\}$ das Fahrzeug Delfim als Führungsfahrzeug gesetzt. Anschließend folgt das in Abbildung A.2 dargestellte *Punktmanöver 1*, welches die Endpunkte und Sollgeschwindigkeiten der beiden Fahrzeuge in den Zeilen mit den Nebenelementnummern 3 und 4 beinhaltet.

```
#M_COORDINATEDPATHFOLLOWING_POINT,7,{0,1},90,{-30,0,0},5000,2600
2,,5000,2600,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
3,,4970,2600,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
```

Da sich die angestrebte Formation zum vorhergehenden Manöver nicht ändert, beinhaltet die erste Zeile die während des formationsbildenden Manövers festgelegte Konstellation sowie die Zielkoordinate des Führungsfahrzeugs. Das darauf folgende Bogenmanöver wird innerhalb des Teammissionsplans durch folgende Syntax beschrieben:

```
#M_COORDINATEDPATHFOLLOWING_ARC,8,{0,1},270,{30,0,0},5000,2600,5060,
2600,5030,2600,1
4,,5000,2600,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
```

```
5,,5060,2600,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
6,,4970,2600,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
7,,5090,2600,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
```

Innerhalb der ersten Zeile der dargestellten Syntax ist das Bogenmanöver des Führungsfahrzeugs durch die Angabe des Start-, End- und Zentrumspekts sowie durch die Angabe der Drehrichtung beschrieben. Da sich am Ende des Manövers die Ausrichtung der Formation ändert, muss dies in der ersten Zeile dieses Missionselements beachtet werden und führt zu einem neuen Sollkurs von 270° bei einem Formationschema von $\{30,0,0\}$. In den Zeilen mit den Nebenelementnummern 4 und 5 sind die Bewegungsparameter des Fahrzeugs Delfim angegeben. Die darin enthaltenen Positionen beschreiben nochmals die Start- und Endkoordinate des entsprechenden Bogenmanövers. Analog dazu finden sich in den Zeilen mit den Nebenelementnummern 6 und 7 die Bewegungsparameter des Fahrzeugs DelfimX. Im Anschluss an das beschriebene Bogenmanöver folgt das durch die folgende Syntax realisierte Punktmanöver:

```
#M_COORDINATEDPATHFOLLOWING_POINT,9,{0,1},270,{30,0,0},5060,2500
8,,5060,2500,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
9,,5090,2500,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
```

Den Abschluss der Mission bildet das formationsbildende Manöver *M_Final*, welches in diesem Fall lediglich die Endpositionen des vorhergehenden Punktmanövers beinhaltet und durch folgende Syntax innerhalb des Teammissionsplans realisiert ist:

```
#M_FINAL,10,{0,1},270,{30,0,0}
10,,5060,2500,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
11,,5090,2500,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
#END,11
```


A.1.2 Einzelmissionsplan Delfim

Auf Basis des vorgestellten Teammissionsplans wird in diesem Abschnitt der daraus resultierende Einzelmissionsplan des Fahrzeugs Delfim beschrieben. Der Kopfteil des Missionsplans ist in der kommenden Syntax dargestellt und enthält neben den Fahrzeugdetails die Definition des Missionsgebiets, die Platzhalterposition sowie die Übersetzung des *MLINIT* Elements durch ein Wartemanöver.

```
1.4,CART,43.0607827614794,5.8721736846899
#VEHICLE,1,3,Delfim,Delfim,delfim.xml
#MISSIONCONSTRAINTS,2,0,{5032.16,2594.46,161.174,250.218,0},300,3600
#PLACEHOLDER,3,4956.88,2714.22
#REFNO,4,5
#POINT,5
0,,4956.88,2714.22,0,0,0,0,0,4,3600,0,0,,1.5
#INIT,6
#REPORT,7
```

Im Anschluss an den Kopfteil des Missionsplans findet sich die Übersetzung des formationsbildenden Manövers durch ein Warte-, zwei Bogen- sowie ein Punktmanöver.

```
#REFNO,8,6
#POINT,9
1,,5000,2500,0,0,0,0,0,4,3600,0,300,,1.5
#ARC,10,5000,2500,5000,2500,4956.88,2714.22,0
2,,5000,2500,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
3,,5000,2500,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
4,,5000,2500,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
5,,5000,2500,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
6,,5000,2500,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
```

```
7,,5000,2500,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
8,,5000,2500,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
#ARC,11,5000,2500,5000,2500,4956.88,2714.22,0
9,,5000,2500,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
10,,5000,2500,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
11,,5000,2500,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
12,,5000,2500,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
13,,5000,2500,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
14,,5000,2500,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
15,,5000,2500,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
#POINT,12
16,,5000,2500,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
```

Da zum Zeitpunkt der Planung die Startposition der Fahrzeuge nicht bekannt ist, enthalten alle Koordinaten den Startpunkt der Mission. Des Weiteren besitzen die Zentrumsunkte beider Bogenmanöver die Koordinate der Platzhalterposition, um sie als Punktmanöver einzustufen. Befinden sich die Fahrzeuge zu Beginn der Mission in unmittelbarer Entfernung zum realen Startpunkt, ist unter diesen Voraussetzungen keine weitere Umplanung der Koordinaten notwendig. Die Fahrzeuge würden diese Koordinate direkt anfahren und mit dem kommenden Missionselement beginnen, welches in diesem Fall das in der folgenden Syntax dargestellte Punktmanöver ist:

```
#REFNO,13,7
#POINT,14
17,,5000,2600,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
```

Die Übersetzung des darauf folgenden Bogenmanövers beinhaltet zwei Stufen, welche sich ebenfalls in der Syntax des Missionsplans wiederfinden:

```
#REFNO,15,8
#ARC,16,5000,2600,5060,2600,5030,2600,1
18,,5000,2600,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
19,,5002.28,2611.48,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
20,,5008.79,2621.21,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
21,,5018.52,2627.72,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
22,,5030,2630,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
23,,5041.48,2627.72,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
24,,5051.21,2621.21,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
25,,5057.72,2611.48,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
26,,5060,2600,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
```

Neben der allgemeinen Beschreibung des Kreisbogens durch Start-, End- und Zentrumspunkt sowie der Drehrichtung innerhalb der ersten Zeile, findet sich in den Nebenelementzeilen eine etappenweise Darstellung des Bogens. Diese wird von Fahrzeugen genutzt, die eigenständig keinen Kreisbogen realisieren können. Im Anschluss an dieses Element findet sich das in der folgenden Syntax dargestellte Punktmanöver:

```
#REFNO,17,9
#POINT,18
27,,5060,2500,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
```

Das Ende der Mission bildet die Übersetzung des formationsbildenden Manövers *M_FINAL* und ergibt folgende Syntax:

```
#REFNO,19,10
#POINT,20
28,,5060,2500,0,0,0,1,0,4,3600,0,300,,1.5
#ARC,21,5060,2500,5060,2500,4956.88,2714.22,0
```

```

29,,5060,2500,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
30,,5060,2500,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
31,,5060,2500,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
32,,5060,2500,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
33,,5060,2500,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
34,,5060,2500,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
35,,5060,2500,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
#ARC,22,5060,2500,5060,2500,4956.88,2714.22,0
36,,5060,2500,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
37,,5060,2500,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
38,,5060,2500,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
39,,5060,2500,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
40,,5060,2500,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
41,,5060,2500,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
42,,5060,2500,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
#POINT,23
43,,5060,2500,0,0,0,1,0,4,3600,0,300,,1.5
#REPORT,24
#END,25

```

Die Übersetzung von *M_FINAL* ist dabei analog zur Übersetzung des Elements *M_GOTOFORMATION* zu Beginn der vorgestellten Mission, wird allerdings mit einem Wartemanöver abgeschlossen. Aus diesem Grund weist das durch die Nebenelementzeile 43 beschriebene Punktmanöver für den *Wegpunkttyp* den Wert 4 auf, um es als Wartemanöver zu klassifizieren.

A.2 Missionsplan mit einem mäanderförmigen Manöver

Abbildung A.3 zeigt einen Missionsplan für zwei Fahrzeuge, basierend auf einem mäanderförmigen Manöver. Der in Abbildung A.3 dargestellte Mäanderpfad wird im vorliegenden Beispiel durch einen Suchprozess realisiert, welcher eine Zielverfolgung innerhalb des blau gekennzeichneten Bereichs einleiten soll.

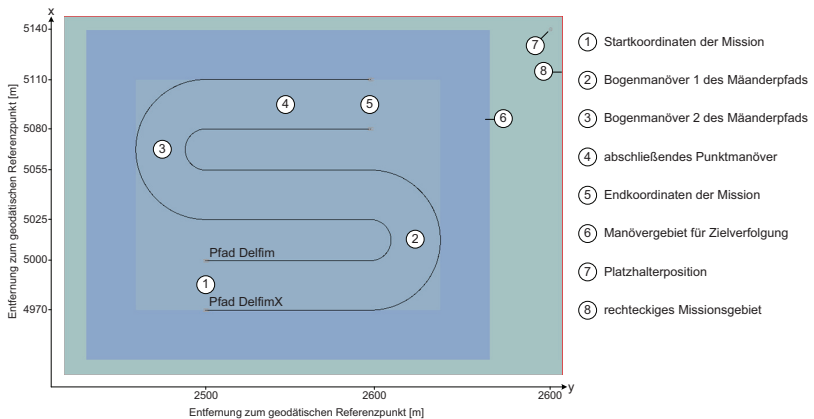


Abbildung A.3: Teammissionsplan zur Zielverfolgung auf Basis eines mäanderförmigen Manövers

A.2.1 Teammissionsplan

Analog zu dem im Unterabschnitt A.1.1 beschriebenen Beispiel, ergibt sich für den Kopfteil sowie das erste formationsbildende Manöver die folgende Syntax innerhalb des Teammissionsplans:

```
1.4,CART,43.0607827614794,5.8721736846899
#VEHICLE,1,3,Delfim,Delfim,delfim.xml
```

```
#VEHICLE,2,4,DelfimX,DelfimX,delfimx.xml
#MISSIONCONSTRAINTS,3,0,{5039.58,2565.25,217.817,302.802,0},300,3600
#PLACEHOLDER,4,5140.5,2709.44
#M_INIT,5,1.5
#M_GOTOFORMATION,6,{0,1},90,{-30,0,0}
0,,5000,2500,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
1,,4970,2500,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.51
```

Das im Anschluss geplante mäanderförmige Manöver *M_SEARCHINGPROCESS* ist durch folgende Syntax im Teammissionsplan beschrieben:

```
#M_SEARCHINGPROCESS,7,{0,1},90,{-30,0,0},5162.5,2450,4917.5,2650,3,90,
    100,25,25,85,1,1,0,1,0,5000,2500,0,300,0,1,0
2,,5000,2500,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5,0,
3,,5000,2600,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5,0,
4,,5025,2600,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5,0,
5,,5025,2500,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5,0,
6,,5110,2500,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5,0,
7,,5110,2600,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5,0,
8,,4970,2500,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5,0,
9,,4970,2600,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5,0,
10,,5055,2600,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5,0,
11,,5055,2500,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5,0,
12,,5080,2500,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5,0,
13,,5080,2600,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5,0,
```

In der ersten Zeile der dargestellten Syntax ist neben der Prioritätsliste, dem Sollkurs und der Abschlussformation der Fahrzeuge das den Mäanderpfad umspannende Missionsgebiet definiert, welches dem Folgemanöver als Begrenzung dienen kann. Die Beschreibungen des in Abbildung A.3 dargestellten Mäanderpfads findet sich in den

Nebenelementzeilen dieses Missionselements. Für das Fahrzeug Delfim beginnt diese mit der Angabe des Startpunktes des Mäanderpfads in der Zeile mit der Nebenelementnummer 2. Darauf folgen in den Zeilen mit den Nebenelementnummern 3 bis 6, die Start- und Endpunkte der beiden Bogenmanöver. Die Koordinate des Endpunktes des Mäanderpfads ist nach dem Endpunkt des letzten Bogenmanövers, in der Zeile mit der Nebenelementnummer 7, aufgelistet. Analog dazu enthalten die Zeilen mit den Nebenelementnummern 8 bis 13 die Beschreibung des Mäanderpfads für das Fahrzeug DelfimX. Im Anschluss an den Suchprozess findet sich in diesem Beispiel das in der folgenden Syntax beschriebene Missionselement zur Zielverfolgung:

```
#M_COOPERATIVETARGETPURSUIT,8,0,{5040,2550,245,200,90},300,1600,{0,1},
    90,{-30,0,0},2,11,250
14,,5140.5,2709.44,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5,0,
15,,5140.5,2709.44,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5,0,
```

Es beinhaltet neben der Beschreibung des Manövergebiets Angaben über das zu verfolgende Ziel sowie die Entfernung, die zu diesem einzuhalten ist. Da das Missionselement während der Planungsphase nicht realisiert werden kann, finden sich alle notwendigen Informationen zu den Bewegungsparametern für Delfim und DelfimX in den Zeilen mit den Nebenelementnummern 14 und 15. Als Koordinate enthalten die Bewegungsparameter jeweils die Platzhalterposition.

Den Abschluss der vorgestellten Mission bildet das in der folgenden Syntax gezeigte formationsbildende Element.

```
#M_FINAL,9,{0,1},90,{-30,0,0}
16,,5110,2600,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
17,,5080,2600,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
#END,10
```

A.2.2 Einzelmissionsplan Delfim

Auf Basis des verwendeten Missionsszenarios wird in diesem Abschnitt der zugehörige Einzelmissionsplan des Fahrzeugs Delfim beschrieben. Analog zum dem in Unterabschnitt A.1.2 beschriebenen Beispiel ergibt sich der Kopfteil des resultierenden Einzelmissionsplans mit folgender Syntax:

```
1.4,CART,43.0607827614794,5.8721736846899
#VEHICLE,1,3,Delfim,Delfim,delfim.xml
#MISSIONCONSTRAINTS,2,0,{5039.58,2565.25,217.817,302.802,0},300,3600
#PLACEHOLDER,3,5140.5,2709.44
#REFNO,4,5
#POINT,5
0,,5140.5,2709.44,0,0,0,0,0,4,3600,0,0,,1.5
#INIT,6
#REPORT,7
#REFNO,8,6
#POINT,9
1,,5000,2500,0,0,0,0,0,4,3600,0,300,,1.5
#ARC,10,5000,2500,5000,2500,5140.5,2709.44,0
2,,5000,2500,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
3,,5000,2500,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
4,,5000,2500,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
5,,5000,2500,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
6,,5000,2500,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
7,,5000,2500,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
8,,5000,2500,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
#ARC,11,5000,2500,5000,2500,5140.5,2709.44,0
9,,5000,2500,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
10,,5000,2500,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
```



```

11,,5000,2500,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
12,,5000,2500,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
13,,5000,2500,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
14,,5000,2500,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
15,,5000,2500,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
#POINT,12
16,,5000,2500,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5

```

Im Anschluss an den Kopfteil findet sich innerhalb des Missionsplans der mäanderförmige Pfad des Suchprozesses. Dieser wird durch ein Punktmanöver eingeleitet, welches den Startpunkt des Mäanders enthält. Der weitere Pfadverlauf wird bis auf den letzten Geradenabschnitt lediglich über Bogenmanöver beschrieben. Das Fahrzeug muss in diesem Fall in der Lage sein, die Geradenabschnitte zwischen den Bogenmanövern eigenständig zu realisieren.

```

#REFNO,13,7
#POINT,14
17,,5000,2500,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
#ARC,15,5000,2600,5025,2600,5012.5,2600,1
18,,5000,2600,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
19,,5000.95,2604.78,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
20,,5003.66,2608.84,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
21,,5007.72,2611.55,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
22,,5012.5,2612.5,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
23,,5017.28,2611.55,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
24,,5021.34,2608.84,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
25,,5024.05,2604.78,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
26,,5025,2600,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
#ARC,16,5025,2500,5110,2500,5067.5,2500,0
27,,5025,2500,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5

```

```

28,,5028.24,2483.74,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
29,,5037.45,2469.95,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
30,,5051.24,2460.74,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
31,,5067.5,2457.5,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
32,,5083.76,2460.74,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
33,,5097.55,2469.95,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
34,,5106.76,2483.74,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
35,,5110,2500,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
#POINT,17
36,,5110,2600,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5

```

Der mäanderförmige Suchprozess wird gefolgt von der Übersetzung des Zielverfolgungsmanövers *M_COOPERATIVETARGETPURSUIT*. Diese wird durch ein Wartemanöver eingeleitet und besitzt des Weiteren zwei Bogenmanöver, welche für eine alternierende Umplanung genutzt werden. Der Aufbau ist daher angelehnt an die Übersetzung des formationsbildenden Manövers. Da dieses Manöver vorab nicht geplant werden kann, enthalten alle Positionsangaben den Wert der Platzhalterposition.

```

#REFNO,18,8
#POINT,19
37,,5140.5,2709.44,0,0,0,1,0,4,3600,0,300,,1.5
#ARC,20,5140.5,2709.44,5140.5,2709.44,5140.5,2709.44,0
38,,5140.5,2709.44,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
39,,5140.5,2709.44,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
40,,5140.5,2709.44,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
41,,5140.5,2709.44,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
42,,5140.5,2709.44,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
43,,5140.5,2709.44,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
44,,5140.5,2709.44,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
#ARC,21,5140.5,2709.44,5140.5,2709.44,5140.5,2709.44,0

```

```

45,,5140.5,2709.44,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
46,,5140.5,2709.44,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
47,,5140.5,2709.44,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
48,,5140.5,2709.44,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
49,,5140.5,2709.44,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
50,,5140.5,2709.44,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
51,,5140.5,2709.44,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5

```

Den Abschluss des Missionsplans bildet, analog zu Unterabschnitt A.1.2, die Übersetzung des Teamelements *M_FINAL* mit folgender Syntax (gekürzt):

```

#REFNO,22,9
#POINT,23
52,,5110,2600,0,0,0,1,0,4,3600,0,300,,1.5
#ARC,24,5110,2600,5110,2600,5140.5,2709.44,0
53,,5110,2600,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
54,,5110,2600,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
55,,5110,2600,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
56,,5110,2600,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
57,,5110,2600,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
58,,5110,2600,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
59,,5110,2600,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
#ARC,25,5110,2600,5110,2600,5140.5,2709.44,0
60,,5110,2600,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
...
66,,5110,2600,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
#POINT,26
67,,5110,2600,0,0,0,1,0,4,3600,0,300,,1.5
#REPORT,27
#END,28

```

A.3 Missionsplan mit hierarchisch gestuftem Manöver

Abbildung A.4 zeigt einen Missionsplan für zwei Fahrzeuge, welcher ein hierarchisch gestuftes Manöver innerhalb der mit den Nummern 3 und 4 gekennzeichneten Missionsabschnitte enthält. Die Besonderheiten dieses Manövertyps während der Planung sollen in diesem Abschnitt schwerpunktmäßig betrachtet werden. Auf eine genaue Beschreibung des grundlegenden Aufbaus des Teammissionsplans sowie der Einzelmissionspläne, welcher in den Abschnitten A.1 und A.2 dargestellt ist, wird daher verzichtet.

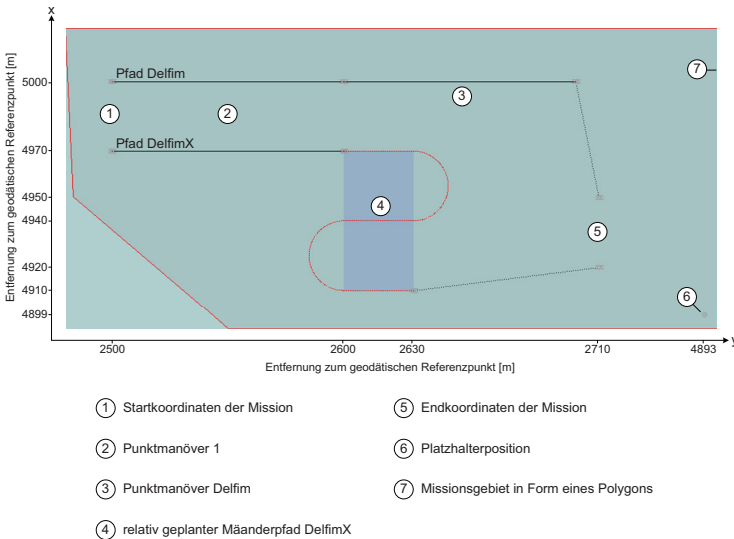


Abbildung A.4: Teammissionsplan für ein hierarchisch gestuftes Manöver

A.3.1 Teammissionsplan

Für das in Abbildung A.4 gezeigte Beispiel ergibt sich bis inklusive des *Punktmanövers* 1 folgende Syntax im zugehörigen Teammissionsplan:

```

1.4,CART,43.0607827614794,5.8721736846899
#VEHICLE,1,3,Delfim,Delfim,delfim.xml
#VEHICLE,2,4,DelfimX,DelfimX,delfimx.xml
#MISSIONCONSTRAINTS,3,1,{5022.99,2480.01,5022.99,2761.44,4893.42,
    2761.44,4893.42,2550.16,4950.36,2483.32,5022.99,2480.01},300,3600
#PLACEHOLDER,4,4899.35,2755.59
#M_INIT,5,1.5
#M_GOTOFORMATION,6,{0,1},90,{-30,0,0}
0,,5000,2500,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
1,,4970,2500,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
#M_COORDINATEDPATHFOLLOWING_POINT,7,{0,1},90,{-30,0,0},5000,2600
2,,5000,2600,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
3,,4970,2600,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5

```

Im Anschluss findet sich die Einleitung des hierarchisch gestuften Manövers, welche für die einzelnen Gruppen die Prioritätsliste, die initiale Ausrichtung der Fahrzeuge sowie das Formationsschema enthält. Da im vorliegenden Beispiel die beiden Gruppen aus jeweils nur einem Fahrzeug bestehen, sind die zugehörigen Formationsschemas leer.

```
#M_HIERARCHICTRIGGEREDACTIVITIES,8,{0},90,{},{1},90,{}
```

Die Beschreibung der Manöver der einzelnen Gruppen erfolgt durch Standard-Teamelemente und wird jeweils durch das Element *#GROUP* eingeleitet. Für die erste Gruppe, bestehend aus dem Fahrzeug Delfim, ergibt sich somit folgende Syntax im Teammissionsplan:

```

#GROUP,9,1,3,{4899.35,2755.59,0,0},3,0,0
#M_COORDINATEDPATHFOLLOWING_POINT,10,{0},90,{},5000,2700
4,,5000,2700,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5

```

Für den relativ geplanten mäanderförmigen Pfad der zweiten Gruppe ergibt sich dadurch folgende Syntax:

```
#GROUP,11,2,3,{4970,2600,0,0},0,0,0
#M_COORDINATEDPATHFOLLOWING_LAWNMOWER,12,{1},90,{},4955,2585,4925,2645,
    3,90,30,30,30,30,0,1,0,1,0,4970,2600,0,300,0,1,0
5,,4970,2600,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
6,,4970,2630,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
7,,4940,2630,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
8,,4940,2600,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
9,,4910,2600,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
10,,4910,2630,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
```

Da die einzelnen Gruppenabschnitte theoretisch mehrere Missionselemente enthalten können, muss das hierarchisch gestufte Manöver definiert beendet werden. Andernfalls wäre keine Trennung zwischen von darauf folgenden Teamelementen möglich. Dies wird über die folgende Syntax realisiert:

```
#END_HIERARCHICTRIGGEREDACTIVITIES,13
```

Da ein hierarchisch gestuftes Manöver nach dem Beenden keine Formation garantiert, erfordert es ein formationsbildendes Folgeelement. Dies wird durch das Element *#M_FINAL*, welches gleichzeitig den Abschluss des Teammissionsplans darstellt, realisiert.

```
#M_FINAL,14,{0,1},90,{-30,0,0}
11,,4950,2710,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
12,,4920,2710,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
#END,15
```

A.3.2 Einzelmissionsplan Delfim

Entsprechend des vorgestellten Teammissionsplans ergibt sich für den ersten Missionsabschnitt des Fahrzeugs Delfim die folgende Syntax:

```
1.4,CART,43.0607827614794,5.8721736846899
#VEHICLE,1,3,Delfim,Delfim,delfim.xml
#MISSIONCONSTRAINTS,2,1,{5022.99,2480.01,5022.99,2761.44,4893.42,
    2761.44,4893.42,2550.16,4950.36,2483.32,5022.99,2480.01},300,3600
#PLACEHOLDER,3,4899.35,2755.59
#REFNO,4,5
#POINT,5
0,,4899.35,2755.59,0,0,0,0,0,4,3600,0,0,,1.5
#INIT,6
#REPORT,7
#REFNO,8,6
#POINT,9
1,,5000,2500,0,0,0,0,0,4,3600,0,300,,1.5
#ARC,10,5000,2500,5000,2500,4899.35,2755.59,0
2,,5000,2500,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
3,,5000,2500,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
4,,5000,2500,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
5,,5000,2500,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
6,,5000,2500,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
7,,5000,2500,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
8,,5000,2500,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
#ARC,11,5000,2500,5000,2500,4899.35,2755.59,0
9,,5000,2500,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
10,,5000,2500,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
11,,5000,2500,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
```

```
12,,5000,2500,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
13,,5000,2500,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
14,,5000,2500,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
15,,5000,2500,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
#POINT,12
16,,5000,2500,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
#REFNO,13,7
#POINT,14
17,,5000,2600,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
```

Die Übersetzung der Standard-Teamelemente geschieht dabei analog zu den Beispielen der Abschnitte A.1 und A.2. Da das hierarchisch gestufte Manöver für die einzelnen Gruppen unterschiedliche Teamelemente erlaubt, muss es gesondert betrachtet werden, um Unterschiede in der Nummerierung der Hauptelemente ausgleichen zu können. Dies wird durch die Verwendung des Elements *#SYNC* erreicht. Für das Fahrzeug Delfin ist innerhalb des hierarchisch gestuften Manövers ein Punktmanöver vorgesehen, dessen Übersetzung die folgende Syntax zeigt:

```
#REFNO,15,8
#POINT,16
18,,5000,2700,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
#SYNC,17,8
#SYNC,18,8
#SYNC,19,8
#SYNC,20,8
```

Da die Übersetzung des mäanderförmigen Manövers der zweiten Gruppe (siehe Unterabschnitt A.3.3) mehr Hauptelemente besitzt als die Übersetzung des Punktmanövers der ersten Gruppe, werden die fehlenden Elemente durch vier *#SYNC*-Elemente ersetzt. Diese dienen lediglich der Anpassung der fortlaufenden Nummerierung der

Hauptelemente, welche für die weiteren Elemente des Missionsplans für alle Fahrzeuge identisch sein muss. Die folgende Syntax zeigt die Übersetzung des letzten und formationsbildenden Teammissionselements *#M_FINAL*. Die Nummerierung der Hauptelemente ist dabei identisch mit der Nummerierung der entsprechenden Elemente des Einzelmissionsplans des Fahrzeugs DelfimX im Unterabschnitt A.3.3.

```
#REFNO,21,14
#POINT,22
19,,4950,2710,0,0,0,0,0,4,3600,0,300,,1.5
#ARC,23,4950,2710,4950,2710,4899.35,2755.59,0
20,,4950,2710,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
21,,4950,2710,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
22,,4950,2710,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
23,,4950,2710,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
24,,4950,2710,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
25,,4950,2710,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
26,,4950,2710,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
#ARC,24,4950,2710,4950,2710,4899.35,2755.59,0
27,,4950,2710,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
28,,4950,2710,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
29,,4950,2710,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
30,,4950,2710,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
31,,4950,2710,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
32,,4950,2710,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
33,,4950,2710,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
#POINT,25
34,,4950,2710,0,0,0,0,0,4,3600,0,300,,1.5
#REPORT,26
#END,27
```

A.3.3 Einzelmissionsplan DelfimX

Der Einzelmissionsplan des Fahrzeugs DelfimX dient lediglich dem Vergleich mit dem Missionsplan des Fahrzeugs Delfim (siehe Unterabschnitt A.3.2) und ist daher an einigen Stellen gekürzt dargestellt. Die folgende Syntax (gekürzt) zeigt die Übersetzung des ersten Teils der Teammission:

```
1.4,CART,43.0607827614794,5.8721736846899
#VEHICLE,1,4,DelfimX,DelfimX,delfimx.xml
#MISSIONCONSTRAINTS,2,1,{5022.99,2480.01,5022.99,2761.44,4893.42,
    2761.44,4893.42,2550.16,4950.36,2483.32,5022.99,2480.01},300,3600
#PLACEHOLDER,3,4899.35,2755.59
#REFNO,4,5
#POINT,5
0,,4899.35,2755.59,0,0,0,0,0,4,3600,0,0,,1.5
#INIT,6
#REPORT,7
#REFNO,8,6
#POINT,9
1,,4970,2500,0,0,0,0,0,4,3600,0,300,,1.5
#ARC,10,4970,2500,4970,2500,4899.35,2755.59,0
2,,4970,2500,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
...
8,,4970,2500,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
#ARC,11,4970,2500,4970,2500,4899.35,2755.59,0
9,,4970,2500,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
...
15,,4970,2500,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
#POINT,12
16,,4970,2500,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
```

#REFNO,13,7

#POINT,14

17,,4970,2600,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5

Die Übersetzung des mäanderförmigen Gruppenelements des hierarchisch gestuften Manöverabschnitts ist in der folgenden Syntax dargestellt und wird durch ein Wartemanöver mit der Hauptelementnummer 16 eingeleitet. Deutlich erkennbar ist der Unterschied in der Anzahl der Hauptelemente zum vergleichbaren Manöverabschnitt im Missionsplan des Fahrzeugs Delfim im Unterabschnitt A.3.2.

#REFNO,15,8

#POINT,16

18,,4970,2600,0,0,0,1,0,4,3600,0,300,,1.5

#POINT,17

19,,4970,2600,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5

#ARC,18,4970,2630,4940,2630,4955,2630,0

20,,4970,2630,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5

21,,4968.86,2635.74,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5

22,,4965.61,2640.61,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5

23,,4960.74,2643.86,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5

24,,4955,2645,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5

25,,4949.26,2643.86,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5

26,,4944.39,2640.61,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5

27,,4941.14,2635.74,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5

28,,4940,2630,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5

#ARC,19,4940,2600,4910,2600,4925,2600,1

29,,4940,2600,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5

30,,4938.86,2594.26,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5

31,,4935.61,2589.39,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5

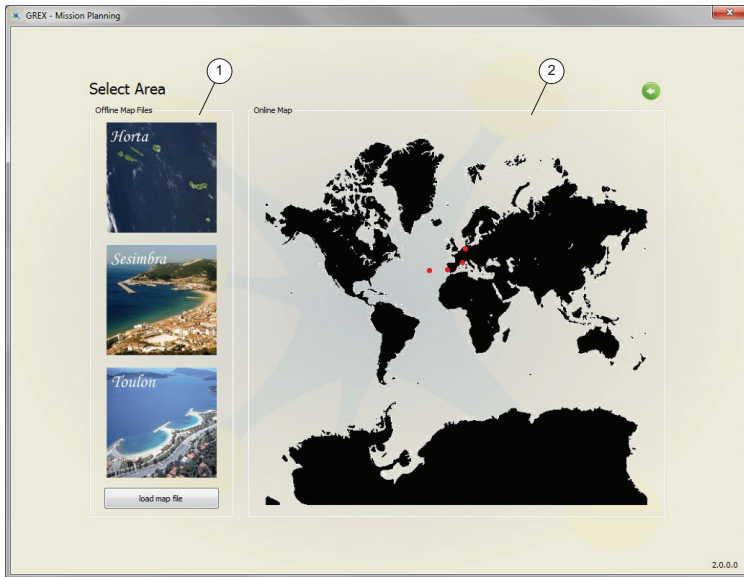
32,,4930.74,2586.14,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5

```
33,,4925,2585,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
34,,4919.26,2586.14,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
35,,4914.39,2589.39,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
36,,4911.14,2594.26,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
37,,4910,2600,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
#POINT,20
38,,4910,2630,0,0,0,1,0,2,0,0,300,,1.5
```

Den Abschluss des Missionsplans bildet die Übersetzung des Teammissionselements *#M_FINAL* und ist in der folgenden Syntax gekürzt dargestellt.

```
#REFNO,21,14
#POINT,22
39,,4920,2710,0,0,0,0,0,4,3600,0,300,,1.5
#ARC,23,4920,2710,4920,2710,4899.35,2755.59,0
40,,4920,2710,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
41,,4920,2710,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
42,,4920,2710,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
43,,4920,2710,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
44,,4920,2710,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
45,,4920,2710,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
46,,4920,2710,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
#ARC,24,4920,2710,4920,2710,4899.35,2755.59,0
47,,4920,2710,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
...
53,,4920,2710,0,0,0,0,0,2,0,0,300,,1.5
#POINT,25
54,,4920,2710,0,0,0,0,0,4,3600,0,300,,1.5
#REPORT,26
#END,27
```

B Grafische Benutzeroberfläche der Missionsplanung



① statische Karten auf Basis von Bilddateien

② Online-Weltkarte über OpenStreetMap

Abbildung B.1: Nutzermenü zur Auswahl des geeigneten Kartenausschnitts. Es können sowohl gespeicherte Bilddaten als auch die Online-Weltkarte von OpenStreetMap [OSM06] genutzt werden.

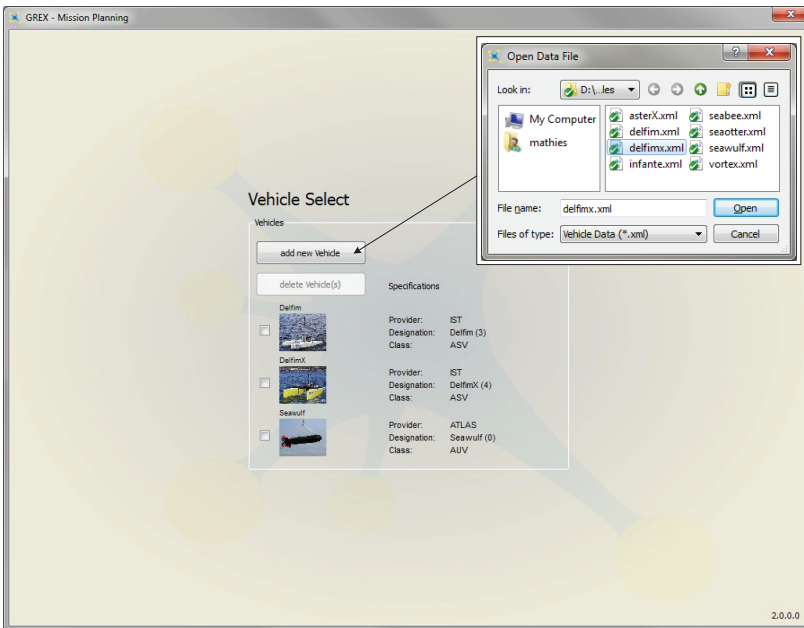
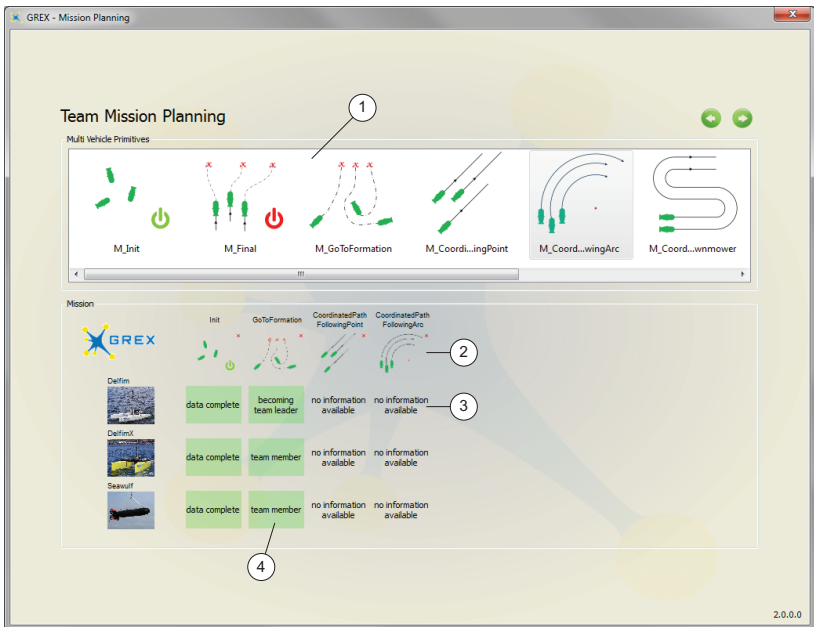
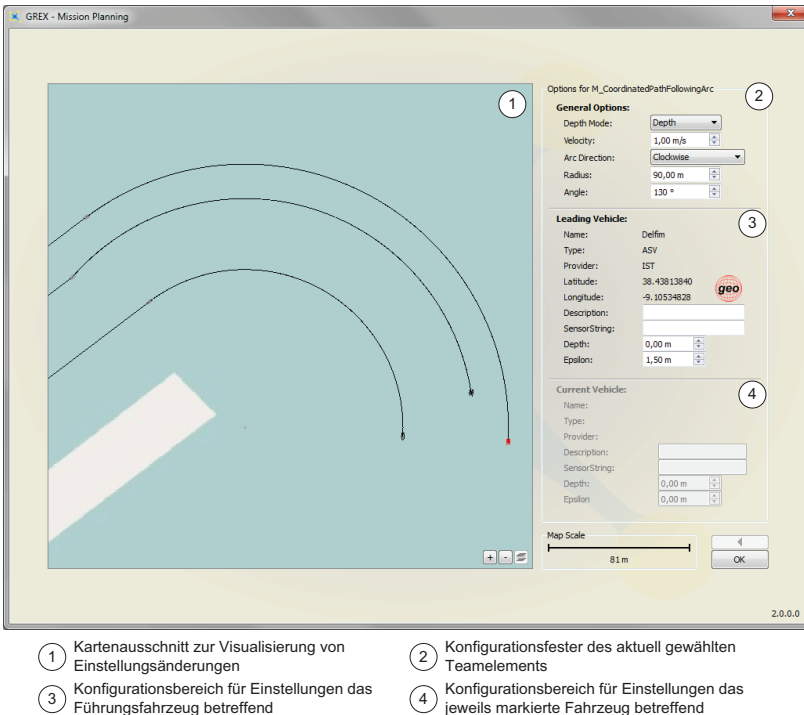


Abbildung B.2: Nutzermenü zur Auswahl der Fahrzeuge, die an einer Mission teilnehmen sollen. Die Auswahl erfolgt über die in Anhang C vorgestellten Fahrzeugdatensätze. Neben Basisinformationen wird ein Bild der Fahrzeuge gezeigt. Des Weiteren erfolgt eine automatische Prüfung der Fahrzeugkonstellation.



- ① verfügbare Teammissionselemente
- ② eingefügtes und unkonfiguriertes Missionselement
- ③ Informationsfeld eines Fahrzeugs bezogen auf jeweiliges Missionselement (unkonfiguriert)
- ④ Informationsfeld eines Fahrzeugs bezogen auf jeweiliges Missionselement (fertig konfiguriert)

Abbildung B.3: Nutzermenü zur elementbasierten Planung der Mission. Neben den verfügbaren Teammissionselementen bietet die Oberfläche einen Überblick zum Konfigurationsstatus.



- ① Kartenausschnitt zur Visualisierung von Einstellungsänderungen
- ② Konfigurationsfelder des aktuell gewählten Teamelements
- ③ Konfigurationsbereich für Einstellungen des Führungsfahrzeug betreffend
- ④ Konfigurationsbereich für Einstellungen des jeweils markierte Fahrzeug betreffend

Abbildung B.4: Nutzermenü zum Konfigurieren eines Teamelements. Das Konfigurationsfelder wird dabei entsprechend dem gewählten Teamelement angepasst, um individuelle Einstellungen der Missionselemente zu ermöglichen.

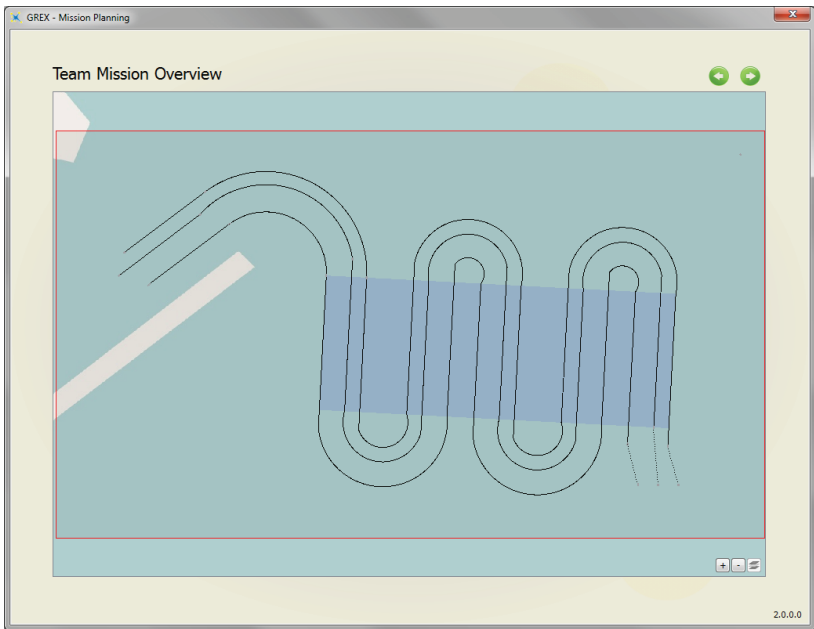
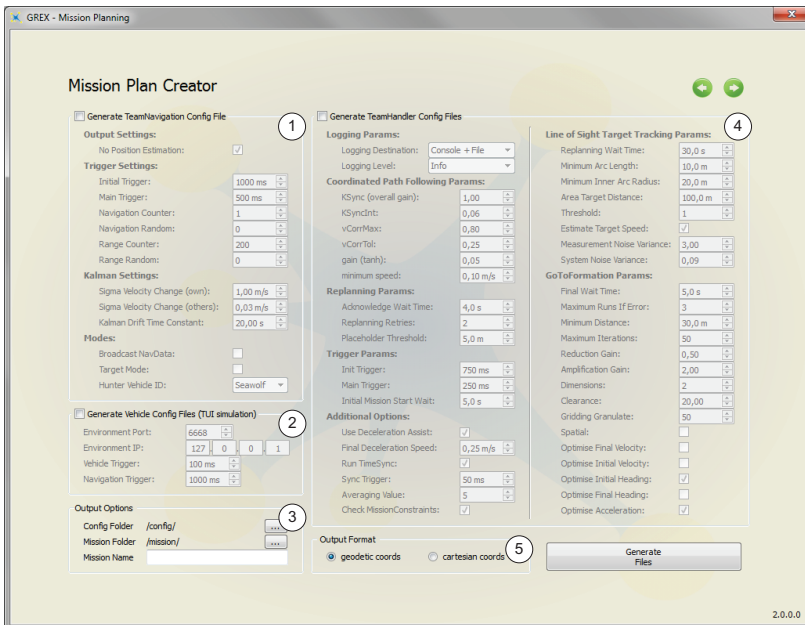


Abbildung B.5: *Nutzermenü zur Ansicht und visuellen Nachkontrolle der geplanten Teammission.*



- | | |
|--|--|
| 1 Konfigurationseinstellungen für Teamnavigationsmodul | 2 Konfigurationseinstellungen für Fahrzeugsimulation |
| 3 Optionsfeld zur Wahl des Ausgabeverzeichnis sowie des Missionsnamens | 4 Konfigurationseinstellungen für Teammanagement |
| 5 Wahl des Koordinatensystems | |

Abbildung B.6: Nutzermenü für alle Konfigurationseinstellungen bezüglich des Missionsplans, der Koordinatensystemwahl sowie den Einstellungen für die Konfigurationsdateien weiterer Softwaremodule.

C Aufbau der Fahrzeugdatensätze

Für eine teamorientierte Missionsplanung, das Teammanagement sowie den Aufbau einer realitätsnahen Simulation verschiedener Fahrzeuge, wird eine Reihe von fahrzeug-spezifischen Daten benötigt. Um diese sowohl nutzer- als auch softwarefreundlich lesen, speichern und editieren zu können, werden sie in einer XML Struktur abgelegt, deren Aufbau in diesem Kapitel eingehend beschrieben wird. Weiterhin werden alle notwendigen Inhalte eines Datensatzes dargestellt und anhand eines Beispiels verdeutlicht.

C.1 Aufbau der XML basierten Dateistruktur

Die folgende Syntax zeigt den Basisaufbau der definierten XML Struktur für einen kompletten Fahrzeugdatensatz, beginnend mit dem Standardkopfteil innerhalb der ersten beiden Zeilen, der die Datei als XML Dokument klassifiziert.

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" standalone="no"?>
<!DOCTYPE Configuration SYSTEM "Configuration.dtd">
<Configuration>
  <section>
    <sname>Sektionsname</sname>
    <scomment>Kommentar</scomment>
    <parameters>
```

```
<parameter>
  <name>Parametername</name>
  <datatype>Datentypnotation</datatype>
  <value>Parameterwert</value>
  <unit>Maßeinheitennotation</unit>
  <type>Typnotation</type>
  <description>Beschreibung</description>
</parameter>
...
<parameter>
...
</parameter>
</parameters>
</section>
...
<section>
  <sname>Sektionsname</sname>
  <scomment>Kommentar</scomment>
  <parameters>
    <parameter>
      ...
    </parameter>
    ...
    <parameter>
      ...
    </parameter>
  </parameters>
</section>
</Configuration>
```

Alle notwendigen Fahrzeuginformationen finden sich, durch einzelne Sektionen *section* unterteilt, innerhalb des Knotens *Configuration*. Jede Sektion beinhaltet dabei einen Satz von Parametern *parameters* und ermöglicht dadurch eine logische Kategorisierung der Fahrzeugdaten. Der *Sektionsname* beschreibt die Gruppe der Parameter und kann durch einen *Kommentar* komplettiert werden. Die einzelnen Fahrzeuginformationen finden sich jeweils in einem *parameter*-Knoten und sind durch folgende Attribute definiert:

- *Parametername*
- *Datentypnotation* (siehe Unterabschnitt C.2.1)
- *Parameterwert*
- *Maßeinheitennotation* (siehe Unterabschnitt C.2.2)
- *Typnotation* (siehe Unterabschnitt C.2.3)
- *Beschreibung*.

Die Namensvergabe der Sektionen und Parameter ist dabei vorgegeben, um alle Daten fehlerfrei innerhalb verschiedener Softwareapplikationen auslesen und nutzen zu können. Welche Informationen von einem Fahrzeug gefordert werden, ist in Abschnitt C.3 beschrieben.

C.2 Verwendete Datentypen und Einheiten

C.2.1 Datentypen

Innerhalb eines Datensatzes sind die in Tabelle C.1 gezeigten Datentypen erlaubt und müssen mit den angegebenen Notationen verwendet werden.

Tabelle C.1: Datentypen innerhalb der Fahrzeugspezifikation

Notation	Beschreibung
DT_STRING	textbasierter Wert
DT_DOUBLE	Fließkommawert mit einer Genauigkeit von 15 Stellen
DT_INTEGER	Ganzzahlenwert (Wertebereich: -32768 bis +32768)

C.2.2 Maßeinheiten

Für die Angabe von Maßeinheiten innerhalb eines Datensatzes sind die in Tabelle C.2 dargestellten Notationen zu verwenden.

Tabelle C.2: Maßeinheiten innerhalb der Fahrzeugspezifikation

Notation	Beschreibung
-	keine Maßeinheit
m/s	Geschwindigkeit in Meter pro Sekunde
m/h	Abweichung in Meter pro Stunde
m/s ²	Beschleunigung in Meter pro Sekundenquadrat
deg	Winkel in DEG
deg/s	Winkelgeschwindigkeit pro Sekunde
m	Strecke in Metern
s	Zeit in Sekunden
kg	Masse in Kilogramm
percent	prozentuale Wertangabe

C.2.3 Arten von Informationen

Weiterhin ist es notwendig, für jedes Datenelement die Art der Information zu definieren. Dies geschieht über die in Tabelle C.3 angegebenen Notationen für die verschiedenen Informationsarten.

Tabelle C.3: Informationsarten innerhalb der Fahrzeugspezifikation

Notation	Maßeinheit	Beschreibung
T_DENOTATION	-	allgemeine Bezeichnung
T_IDENTIFIER	-	Angabe von Identifikationsnummern
T_PICTURE	-	Angabe einer Bilddatei
T_INI	-	Angabe von Plugin- und Konfigurationsdateien
T_MEASUREMENT	alle, siehe Tabelle C.2	allgemeiner Messwert
T_VELOCITY	m/s m/h	Geschwindigkeit
T_ACCELERATION	m/s ²	Beschleunigung
T_ANGULARVELOCITY	deg/s	Winkelgeschwindigkeit
T_DISTANCE	m percent	Entfernung
T_ANGLE	deg	Winkel
T_TIME	s	Zeit

Neben der Lesbarkeit unterstützt die Gruppierung der Informationsart das maschinelle Auslesen der Daten und ermöglicht durch die Festlegung zugelassener Maßeinheiten eine Überprüfung der angegebenen Parameter.

C.3 Notwendige Fahrzeuginformationen

Um einen Fahrzeugdatensatz innerhalb der Missionsplanung (siehe Kapitel 4), des Teammanagements (siehe Kapitel 5) und der Fahrzeugsimulation (siehe Unterabschnitt 6.2.1) nutzen zu können, werden bestimmte Parameter vorausgesetzt. Diese sind in den folgenden Tabellen aufgeführt und kurz beschrieben.

Die in Tabelle C.4 allgemeinen Fahrzeuginformationen dienen der Zuordnung des Fahrzeugs und enthalten Angaben über den Betreiber, die Bezeichnung und die Identifikationsnummer des jeweiligen Fahrzeugs.

Tabelle C.4: Allgemeine Fahrzeuginformationen

Sektionsname	Parametername	Beschreibung
GeneralParameters	provider	Providername
	designation	Herstellerbezeichnung des Fahrzeugs
	identifier	Identifikationsnummer
	kind	Fahrzeugtyp
	picture	Bilddatei des Fahrzeugs
	plugin	Software-Plug-in

Weiterhin wird durch den Parameter *kind* eine Typzuweisung ermöglicht. Da sich die vorliegende Arbeit lediglich dem maritimen Bereich widmet, sind folgende Fahrzeugtypen als Funktionswert des Parameters *kind* erlaubt:

- *AUV* für ein autonomes Unterwasserfahrzeug
- *ASV* für ein autonomes Oberflächenfahrzeug
- *ROV* für ein kabelgebundenes ferngesteuertes Fahrzeug.

Für die Darstellung des Fahrzeugs innerhalb der Missionsplanung oder eine Missionsüberwachung wird der Parameter *picture* genutzt, welcher den Dateinamen einer entsprechenden Bilddatei enthält. Weiterhin stellen einige Fahrzeugbetreiber Plug-in- oder Konfigurationsdateien zur Verfügung, die während der Planung verwendet werden können, um einen fahrzeugspezifischen Missionsplan zu erzeugen. Dieser werden über den Parameter *plugin* angegeben.

Allgemeine Angaben zu den Ausmaßen des Fahrzeugs (ohne Zusatzmodule und Antennen) finden sich in der Sektion *PhysicData* und sind in Tabelle C.5 aufgelistet.

Tabelle C.5: *Physikalische Fahrzeuginformationen*

Sektionsname	Parametername	Beschreibung
PhysicData	length	Fahrzeuglänge
	width	Fahrzeugbreite
	height	Fahrzeughöhe
	mass	Fahrzeugmasse

Um eine realistischere Simulation der Fahrzeuge zu erlauben, werden die in Tabelle C.6 dargestellten manöverspezifischen Parameter genutzt.

Tabelle C.6: *Manöverspezifische Fahrzeuginformationen*

Sektionsname	Parametername	Beschreibung
ManoeuvreParameters	arcability	Fähigkeit des eigenständigen Bogenfahrt
	hovermode	Art des Wartemanövers
	hoverarcradius	Kreisradius des Wartemanövers
	hoverspeed	Geschwindigkeit während des Wartemanövers

Sie beschreiben spezifische Fahrzeugeigenschaften, die innerhalb der Simulation aber auch für die Umplanung von Manövern genutzt werden. Ob ein Fahrzeug in der Lage ist, eigenständig vorgegebene Bogensegmente abzufahren, wird über den Parameter *arcability* beschrieben. Kann eine Bogenfahrt durch ein Fahrzeug realisiert werden, besitzt dieser Parameter den Wert 1, andernfalls den Wert 0. Der zweite Teil der Manöverparameter beschreibt das Fahrzeugverhalten während eines Wartemanövers. Ist ein Fahrzeug in der Lage eine bestimmte Position zu halten, so besitzt der *hovermode* den Wert 0. Trifft dies nicht zu, wird über den Parameter *hovermode* das Ersatzmanöver definiert. Der Wert 1 beschreibt ein kreisförmiges Ersatzmanöver, der Wert 2 einen Doppelkreis. Das Ersatzmanöver wird im Folgenden durch die Parameter *hoverarcradius*, für den jeweiligen Kreisradius, und *hoverspeed*, für die Geschwindigkeit während

des Manövers, genauer beschrieben. Um eine Parametrierung des simulierten Fahrzeugmodells sowie eine Überwachung der Fahrzeugfähigkeiten während der Planung oder einer Mission zu erlauben, werden die in den Tabellen C.7 und C.8 dargestellten Bewegungsparameter benötigt. Da sich die Bewegungsparameter der Fahrzeuge über und unter Wasser unterscheiden, finden sie sich innerhalb eines Datensatzes in getrennten Sektionen. Es gilt zu beachten, dass die Sektion *UnderwaterParameter* der Tabelle C.8 zusätzlich alle in Tabelle C.7 dargestellten Parameter enthält. Auf diese wurde zugunsten der Übersicht an dieser Stelle verzichtet.

Tabelle C.7: *Bewegungsparameter an der Wasseroberfläche*

Sektionsname	Parametername	Beschreibung
SurfaceParameter	maxSpeed	maximale Geschwindigkeit
	minSpeed	minimale Geschwindigkeit
	cruiseSpeed	Standardgeschwindigkeit
	posAccel	maximale Beschleunigung
	negAccel	maximale Verzögerung
	headRate	maximale Kursänderung
	rollRate	maximale Rolländerung
	maxRollAngle	maximaler Rollwinkel

Tabelle C.8: *Bewegungsparameter unter Wasser*

Sektionsname	Parametername	Beschreibung
UnderwaterParameter	surfSpeed	Auftauchgeschwindigkeit
	descSpeed	Tauchgeschwindigkeit
	maxPosPitch	maximaler Auftauchwinkel
	maxNegPitch	maximaler Tauchwinkel
	maxPosPitchRate	maximale Winkeländerung beim Auftauchvorgang
	maxNegPitchRate	maximale Winkeländerung beim Tauchvorgang

Die navigationsspezifischen Parameter bilden den letzten Teil der geforderten Informationen und sind in Tabelle C.9 aufgelistet.

Tabelle C.9: *Navigationsspezifische Parameter*

Sektionsname	Parametername	Beschreibung
GlobalNavigation	depthErrRMS	Fehler der Tiefenschätzung
DeadReckoning	velocityErrRMS	Fehler der Geschwindigkeitsschätzung
	positionDrift	Drift der Navigation
GPS	posErrRMS	Fehler der Positionsschätzung
ModemSecification	rangeErrRMS	Fehler der Entfernungsmessung

Sie dienen Algorithmen zur Positionsschätzung als Datenbasis und werden während der Missionsausführung benötigt. Während der Planung einer Mission und innerhalb des Teammanagements finden diese Parameter keine Verwendung.

C.4 Beispiel

Das folgende Beispiel zeigt einen Auszug des Datensatzes des autonomen Unterwasserfahrzeugs Seewolf der Firma ATLAS Elektronik.

<Configuration>

```
<!-- **** Section for general informations about the vehicle **** -->
```

```
<section>
```

```
  <sname>GeneralParameters</sname>
```

```
  <scomment>General informations</scomment>
```

```
  <parameters>
```

```
    <parameter>
```

```
      <name>provider</name>
```

```
      <datatype>DT_STRING</datatype>
```

```
<value>ATLAS</value>
<unit>-</unit>
<type>T_DENOTATION</type>
<description>Provider name</description>
</parameter>

<parameter>
  <name>designation</name>
  <datatype>DT_STRING</datatype>
  <value>Seawulf</value>
  <unit>-</unit>
  <type>T_DENOTATION</type>
  <description>Provider designation</description>
</parameter>

<parameter>
  <name>identifier</name>
  <datatype>DT_INTEGER</datatype>
  <value>0</value>
  <unit>-</unit>
  <type>T_IDENTIFIER</type>
  <description>Unique vehicle identifier</description>
</parameter>

<parameter>
  <name>kind</name>
  <datatype>DT_STRING</datatype>
  <value>AUV</value>
  <unit>-</unit>
  <type>T_DENOTATION</type>
```

```
<description>Vehicle kind</description>
</parameter>

<parameter>
  <name>picture</name>
  <datatype>DT_STRING</datatype>
  <value>seawulf.jpg</value>
  <unit>-</unit>
  <type>T_PICTURE</type>
  <description>Vehicle picture</description>
</parameter>

<parameter>
  <name>plugin</name>
  <datatype>DT_STRING</datatype>
  <value>seawulf.ini</value>
  <unit>-</unit>
  <type>T_INI</type>
  <description>Vehicle plugin for GIM</description>
</parameter>
</parameters>
</section>

<!-- **** Section for some physic data of the vehicle **** -->
<section>
  <sname>PhysicData</sname>
  <scomment>Physical data of vehicle</scomment>
  <parameters>
    <parameter>
      <name>length</name>
```

```

    <datatype>DT_DOUBLE</datatype>
    <value>2.0</value>
    <unit>m</unit>
    <type>T_MEASUREMENT</type>
    <description>Complete length of the vehicle</description>
</parameter>

<parameter>
    <name>width</name>
    <datatype>DT_DOUBLE</datatype>
    <value>0.3</value>
    <unit>m</unit>
    <type>T_MEASUREMENT</type>
    <description>Complete width of the vehicle</description>
</parameter>

...

</parameters>
</section>

...

<!-- **** Section for surface specifications of the vehicle **** -->
<section>
    <sname>SurfaceParameter</sname>
    <scomment>All surface parameters of vehicle</scomment>
    <parameters>
        <parameter>
            <name>maxSpeed</name>
```

```
<datatype>DT_DOUBLE</datatype>
<value>2.000000</value>
<unit>m/s</unit>
<type>T_VELOCITY</type>
<description>Maximum speed on surface</description>
</parameter>

<parameter>
  <name>minSpeed</name>
  <datatype>DT_DOUBLE</datatype>
  <value>0.000000</value>
  <unit>m/s</unit>
  <type>T_VELOCITY</type>
  <description>Minimum speed on surface</description>
</parameter>

<parameter>
  <name>cruiseSpeed</name>
  <datatype>DT_DOUBLE</datatype>
  <value>1.000000</value>
  <unit>m/s</unit>
  <type>T_VELOCITY</type>
  <description>Cruising speed on surface</description>
</parameter>

<parameter>
  <name>posAccel</name>
  <datatype>DT_DOUBLE</datatype>
  <value>1.0</value>
  <unit>m/s^2</unit>
```

```
        <type>T_ACCELERATION</type>
        <description>Maximum positive acceleration</description>
    </parameter>

    ...

</parameters>
</section>

...

<!-- **** Section for modem specifications of the vehicle **** -->
<section>
    <sname>ModemSecification</sname>
    <scomment>Modem specifications</scomment>
    <parameters>
        <parameter>
            <name>rangeErrRMS</name>
            <datatype>DT_DOUBLE</datatype>
            <value>5</value>
            <unit>m</unit>
            <type>T_DISTANCE</type>
            <description>Range error RMS</description>
        </parameter>
    </parameters>
</section>
</Configuration>
```


Literaturverzeichnis

- [ABS09] ALVES, João ; BRIGNONE, Lorenzo ; SCHNEIDER, Matthias: Communication infrastructure for fleets of autonomous marine vehicles: concepts and first results. In: *Proceedings of the 8th Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft MCMC'09*. Guarujá (São Paulo), Brazil, 16-18 September 2009, S. 370–375
- [ACFS01] ANTONELLI, Gianluca ; CHIAVERINI, Stefano ; FINOTELLO, Roberto ; SCHIAVON, Riccardo: Real-time path planning and obstacle avoidance for RAIS: an autonomous underwater vehicle. In: *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 26 (2001), Nr. 2, S. 216–227
- [ACM10] ALMEIDA, Rui ; CRUZ, Nuno ; MATOS, Aníbal: Synchronized Intelligent Buoy Network for Underwater Positioning. In: *Proceedings of the OCEANS'10 MTS/IEEE Seattle*. Seattle, USA, 20-23 September 2010, S. n/a (digital Proceedings)
- [Alr10] ALRIFAEI, Bassam: *Aktive Formationsänderung zur verbesserten hindernisfreien Pfadplanung für Teams aus Autonomen Maritimen Fahrzeugen*, Technische Universität Ilmenau, Diplomarbeit, 2010
- [APM05] AKYILDIZ, Ian F. ; POMPILI, Dario ; MELODIA, Tommaso: Underwater acoustic sensor networks: research challenges. In: *Ad Hoc Networks (ELSEVIER)* 3 (2005), S. 257–279

- [Apo03] APOSTULATOS, T. A.: Hodograph: A useful geometrical tool for solving some difficult problems in dynamics. In: *American Journal of Physics* 71 (2003), Nr. 3, S. 261–266
- [AS09] ALVES, João ; SCHNEIDER, Matthias: A Communication Infrastructure for Cooperative Operation of a Fleet of Heterogeneous Autonomous Marine Vehicles: Concepts and Developments within the GREX Project. In: *Proceedings of the OCEANS'09 IEEE Bremen*. Bremen, Germany, 11-14 May 2009, S. n/a (digital Proceedings)
- [BLF09] BAHR, Alexander ; LEONARD, John J. ; FALLON, Maurice F.: Cooperative Localization for Autonomous Underwater Vehicles. In: *The International Journal of Robotics Research* 28 (2009), June, Nr. 6, S. 714–728
- [BSO09] BATISTA, Pedro ; SILVESTRE, Carlos ; OLIVEIRA, Paulo: Position and Velocity Navigation Systems for Unmanned Vehicles. In: *IEEE Transactions On Control Systems Technology* 17 (2009), May, Nr. 3, S. 707–715
- [BXcCh08] BIN, Liu ; XIAO-CHUAN, Ma ; CHAO-HUAN, Hou: A UKF-based Active Target Tracking Algorithm for High-speed Autonomous Underwater Vehicles. In: *Journal of System Simulation* 20 (2008), April, Nr. 4, S. 947–955
- [CKB⁺07] CHAPPELL, Steven G. ; KOMERSKA, Rick J. ; BLIDBERG, D. R. ; DUARTE, Christiane N. ; MARTEL, Gerald R. ; CRIMMINS, Denise M. ; BELIARD, Michel A. ; NITZEL, Robert ; JALBERT, James C. ; BARTOS, Radim: Recent Field Experience with Multiple Cooperating Solar-Powered AUVs. In: *Proceedings of the 15th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology*. Durham, New Hampshire, USA, 19-22 August 2007, S. n/a
- [CSC⁺09] CUVELIER, Daphne ; SARRAZIN, Jozée ; COLAÇO, Ana ; COPLEY, Jon ; DESBRUYÈRES, Daniel ; GLOVER, Adrian G. ; TYLER, Paul ; SANTOS, Ricardo S.: Distribution and spatial variation of hydrothermal fau-

- nal assemblages at Lucky Strike (Mid-Atlantic Ridge) revealed by high-resolution video image analysis. In: *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 56 (2009), Nr. 11, S. 2026–2040
- [CSFS08] CHITRE, Mandar ; SHAHABUDEEN, Shiraz ; FREITAG, Lee ; STOJANOVIC, Milica: Recent Advances in Underwater Acoustic Communications & Networking. In: *Proceedings of the MTS/IEEE Oceans'08*. Quebec City, Canada, 15-18 September 2008, S. n/a (digital Proceedings)
- [CSS08] CHITRE, Mandar ; SHAHABUDEEN, Shiraz ; STOJANOVIC, Milica: Underwater Acoustic Communications and Networking: Recent Advances and Future Challenges. In: *Marine Technology Society Journal* Spring 2008 (2008), S. 103–116
- [CWRP10] CARRENO, Sebastian ; WILSON, Philip ; RIDAO, Pere ; PETILLOT, Yvan: Survey on Terrain Based Navigation for AUVs. In: *Proceedings of the OCEANS'10 MTS/IEEE Seattle*. Seattle, USA, 20-23 September 2010, S. n/a (digital Proceedings)
- [Eic04] EICHHORN, Mike: An Obstacle Avoidance System for an Autonomous Underwater Vehicle. In: *Proceedings of the International Symposium on Underwater Technology UT'04*. Taipei, Taiwan, 20-23 August 2004, S. 75–82
- [Eic07] EICHHORN, Mike: *Intelligentes Führungskonzept für ein Autonomes Unterwasserfahrzeug in Sondersituationen*, Fakultät für Informatik und Automatisierung, Technische Universität Ilmenau, Diss., 2007
- [GAS⁺10] GLOTZBACH, Thomas ; ALRIFAE, Bassam ; SCHNEIDER, Matthias ; JACOBI, Marco ; ZIMMERMANN, Armin ; AMENT, Christoph: Advanced Trajectory Planning for Obstacle Avoidance of Multiple Unmanned Marine Vehicles (MUMVs). In: *Proceedings of the IFAC Conference on Control*

- Applications in Marine Systems, CAMS 2010*. Rostock-Warnemünde, Germany, 15-17 September 2010, S. 387–392
- [Glo09] GLOTZBACH, Thomas: *Ein Beitrag zur Steuerung von mobilen Systemen auf Grundlage der Bioorientierten Adaptiven Autonomie*, Fakultät für Informatik und Automatisierung, Technische Universität Ilmenau, Diss., 2009
- [GMJ11] GUO, Hongliang ; MENG, Yan ; JIN, Yaochu: Swarm Robot Pattern Formation Using a Morphogenetic Multi-Cellular Based Self-Organization Algorithm. In: *Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA 2011*. Shanghai, China, 9-13 May 2011, S. n/a
- [GMOS07] GLOTZBACH, Thomas ; MARINOV, Martin ; OTTO, Peter ; SCHNEIDER, Matthias: A Concept for Team-Orientated Mission Planning and Formal Language Verification for Heterogenous Unmanned Vehicles. In: *Proceedings of the 52th Internationales Wissenschaftliches Kolloquium IWK 2007*. Ilmenau, Germany, 10-13 September 2007, S. 389–394
- [GPSC05] GHABCHELOO, R. ; PASCOAL, A. ; SILVESTRE, C. ; CARVALHO, D.: Coordinated Motion Control of Multiple Autonomous Underwater Vehicles. In: *Proceedings of the International Workshop on Underwater Robotics IARP IWUR2005*. Genova, Italy, 9-11 November 2005, S. n/a
- [GPZ⁺07] GLOTZBACH, Thomas ; PICINI, Andrea ; ZANGRILLI, Antonio ; EICHORN, Mike ; OTTO, Peter ; SCHNEIDER, Matthias: Evaluation of Different Control Strategies for Teams of Unmanned Marine Vehicles (UMVs) Comparing the Requirements of Underwater Communication and Navigation in MATLAB® Simulations. In: *Proceedings of the 6th International Conference on Computer Applications and Information Technology in the Maritime Industries COMPIT'07*. Cortona, Italy, 23-25 April 2007, S. 331–345

- [GSJO09] GLOTZBACH, Thomas ; SCHNEIDER, Matthias ; JACOBI, Marco ; OTTO, Peter: Obstacle Avoidance for Multiple Unmanned Marine Vehicles (MUMVs) in Close Formation. In: *Proceedings of the OCEANS'09 IEEE Bremen*. Bremen, Germany, 11-14 May 2009, S. n/a (digital Proceedings)
- [GSO07] GLOTZBACH, Thomas ; SCHNEIDER, Matthias ; OTTO, Peter: Team-Oriented Mission Planning (TOMP) for Multiple Unmanned Marine Vehicles: Planning of Cooperative Lawnmowers. In: *Proceedings of the Fourth International Conference on Computational Intelligence, Robotics and Automation CIRAS 2007*. Palmerston North, New Zealand, 28-30 November 2007, S. 50–55
- [GSO08] GLOTZBACH, Thomas ; SCHNEIDER, Matthias ; OTTO, Peter: Multi System Mission Control for Teams of Unmanned Marine Vehicles - Software Structure for Online Replanning of Mission Plans. In: *Proceedings of the 7th International Conference on Computer Applications and Information Technology in the Maritime Industries COMPIT'08*. Liège, Belgium, 21-23 April 2008, S. 185–199
- [GSO09] GLOTZBACH, Thomas ; SCHNEIDER, Matthias ; OTTO, Peter: Path Planning for Coordinated Target Tracking of Heterogeneous Unmanned Marine Vehicle Teams. In: *Proceedings of the 8th Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft MCMC'09*. Guarujá (São Paulo), Brazil, 16-18 September 2009, S. 358–363
- [GZ83] GUSELLA, Riccardo ; ZATTI, Stefano: TEMPO: A Network Time Controller for a Distributed Berkeley UNIX System / EECS Department, University of California, Berkeley. Version: Dec 1983. <http://www.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/1983/5983.html>. 1983 (UCB/CSD-83-163). – Forschungsbericht
- [HGP+09] HÄUSLER, Andreas J. ; GHABCHELOO, Reza ; PASCOAL, Antonio M. ; AGUIAR, A. P. ; KAMINER, Isaac I. ; DOBROKHODOV, Vladimir N.: Tem-

- porally and Spatially Deconflicted Path Planning for Multiple Autonomous Marine Vehicles. In: *Proceedings of the 8th Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft MCMC'09*. Guarujá (São Paulo), Brazil, 16-18 September 2009, S. 376–381
- [JL07] JIA, Qiuling ; LI, Guangwen: Formation Control and Obstacle Avoidance Algorithm of Multiple Autonomous Underwater Vehicles(AUVs) Based on Potential Function and Behavior Rules. In: *Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Automation and Logistics*. Jinan, China, 18-21 August 2007, S. 569–573
- [KK09] KHORRAMI, F. ; KRISHNAMURTHY, P.: A hierarchical path planning and obstacle avoidance system for an autonomous underwater vehicle. In: *Proceedings of the American Control Conference ACC '09*. St. Louis, MO, USA, 10-12 June 2009, S. 3579–3584
- [KMB92] KWAK, Se-Hung ; MCGHEE, R.B. ; BIHARI, Thomas E.: Rational Behavior Model: A tri-level Multiple Paradigm Architecture for Robot Vehicle Control Software / Naval Postgraduate School. Monterey, California, 1992 (NPSCS-92-003). – Forschungsbericht
- [LHZ⁺08] LI, Baosheng ; HUANG, Jie ; ZHOU, Shengli ; BALL, Keenan ; STOJANOVIC, Milica ; FREITAG, Lee ; WILLETT, Peter: Further Results on High-Rate MIMO-OFDM Underwater Acoustic Communications. In: *Proceedings of the MTS/IEEE Oceans'08*. Quebec City, Canada, 15-18 September 2008, S. n/a (digital Proceedings)
- [LSH08] LAMMAS, A. K. ; SAMMUT, K. ; HE, F.: Improving Navigational Accuracy for AUVs using the MAPR Particle Filter. In: *Proceedings of the MTS/IEEE Oceans'08*. Quebec City, Canada, 15-18 September 2008, S. n/a (digital Proceedings)
- [MPM⁺09] MAURELLI, Francesco ; PETILLOT, Yvan ; MALLIOS, Angelos ; RIDAO,

- Pere ; KRUPINSKI, Szymon: Sonar-based AUV localization using an improved particle filter approach. In: *Proceedings of the OCEANS'09 IEEE Bremen*. Bremen, Germany, 11-14 May 2009, S. n/a (digital Proceedings)
- [MSO09] MORGADO, M. ; SILVESTRE, Carlos ; OLIVEIRA, Paulo: Posterior Cramér-Rao bounds analysis for INS/USBL navigation systems. In: *Proceedings of the 8th Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft MCMC'09*. Guarujá (São Paulo), Brazil, 16-18 September 2009, S. 20–25
- [MZJ11] MENG, Yan ; ZHANG, Yuyang ; JIN, Yaochu: Autonomous Self-Reconfiguration of Modular Robots using a Hierarchical Mechanochemical Model. In: *IEEE Computational Intelligence Magazine* 6 (2011), Nr. 1, S. 43–54
- [OSM06] *OpenStreetMap*. <http://www.openstreetmap.org/>, 2006. – Lizens CC-BY-SA <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/>
- [Pfü03] PFÜTZENREUTER, Torsten: An Onboard Mission Replanning System for Autonomous Underwater Vehicles. In: *Proceedings of the 11th IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation '03*. Rodos, Greek, 18-20 Juni 2003, S. n/a (digital Proceedings)
- [Pfü04] PFÜTZENREUTER, Torsten: *Intelligentes Missionsmanagement für autonome mobile Systeme*, Fakultät für Informatik und Automatisierung, Technische Universität Ilmenau, Diss., 2004
- [PFW+08] PONTBRIAND, Clifford ; FARR, Norman ; WARE, Jonathan ; PREISIG, James ; POPENOE, Hugh: Diffuse High-Bandwidth Optical Communications. In: *Proceedings of the MTS/IEEE Oceans'08*. Quebec City, Canada, 15-18 September 2008, S. n/a (digital Proceedings)
- [Pre06] PREISIG, James: Acoustic Propagation Considerations for Underwater Acoustic Communications Network Development. In: *Proceedings of the First ACM International Workshop on UnderWater Networks (WUW-*

- Net'06*). Los Angeles, Carlifornia, USA, 25 September 2006, S. n/a (digital Proceedings)
- [QX07] QI, Wang ; XIAOSU, Xu: Application of unscented Kalman filter to novel terrain passive integrated navigation system. In: *Journal of Southeast University* 23 (2007), April, Nr. 4, S. 545–549
- [SA09] SAÚDE, João ; AGUIAR, Antonio P.: Single Beacon Acoustic Navigation for an AUV in the presence of unknown ocean currents. In: *Proceedings of the 8th Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft MCMC'09*. Guarujá (São Paulo), Brazil, 16-18 September 2009, S. 298–303
- [SA10] SHAH, M. A. ; AOUF, N.: 3D Cooperative Pythagorean Hodograph path planning and obstacle avoidance for multiple UAVs. In: *Proceedings of the 2010 IEEE 9th International Conference on Cybernetic Intelligent Systems (CIS)*. Reading, UK, 1-2 September 2010, S. n/a
- [SAO⁺08] SOUSA, R. ; ALCOCER, A. ; OLIVEIRA, P. ; GHABCHELOO, R. ; PASCOAL, A.: Joint Positioning and Navigation Aiding System for Underwater Robots. In: *Proceedings of the MTS/IEEE Oceans'08*. Quebec City, Canada, 15-18 September 2008, S. n/a (digital Proceedings)
- [Sch09] SCHNEIDER, Matthias: GREX - Software Guidance / Technische Universität Ilmenau. 2009 (urn:nbn:de:gbv:ilm1-2011200360). – Forschungsbericht. – nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=urn:nbn:de:gbv:ilm1-2011200360
- [SEGO07] SCHNEIDER, Matthias ; EICHHORN, Mike ; GLOTZBACH, Thomas ; OTTO, Peter: A High-Level Simulator for heterogeneous marine vehicle teams under real constraints. In: *Proceedings of the 52th Internationales Wissenschaftliches Kolloquium IWK 2007*. Ilmenau, Germany, 10-13 September 2007, S. 377–382
- [SGGO09] SCHNEIDER, Matthias ; GLOTZBACH, Thomas ; GÜTHER, Thomas ; OTTO, Peter: Towards Cooperative Behaviour between Multiple Unmanned

- Marine Vehicles (MUMVs): Team Handling for the first Multi Vehicle Primitives. In: *Proceedings of the 8th International Conference on Computer Applications and Information Technology in the Maritime Industries COMPIT'09*. Budapest, Hungary, 10-12 May 2009, S. 165–184
- [SGJ⁺07] SCHNEIDER, Matthias ; GLOTZBACH, Thomas ; JACOBI, Marco ; MÜLLER, Fabian ; OTTO, Peter: Observer-Based Position Estimation for Coordinated Motion Control of Multiple Unmanned Marine Vehicles. In: *Proceedings of the Seventeenth International Offshore and Polar Engineering Conference ISOPE 2007*. Lisbon, Portugal, 1-6 July 2007, S. 1059–1065
- [SGJ⁺08] SCHNEIDER, Matthias ; GLOTZBACH, Thomas ; JACOBI, Marco ; MÜLLER, Fabian ; EICHORN, Mike ; OTTO, Peter: Kalman Filter Based Team Navigation for Multiple Unmanned Marine Vehicles. In: *Proceedings of the 2008 IEEE Multi-conference on Systems and Control MSC 2008*. San Antonio (Texas), USA, 3-5 September 2008, S. 565–570
- [SR09] SHIMA, Tal (Hrsg.) ; RASMUSSEN, Steven (Hrsg.): *UAV Cooperative Decision and Control*. Philadelphia : Society for Industrial and Applied Mathematics, 2009. – ISBN 978-0-898716-64-1
- [Tho98] THOMAS, H. G.: GIB buoys: an interface between space and depths of the oceans. In: *Proceedings of the Autonomous Underwater Vehicles AUV'98*. Cambridge, Massachusetts, USA, 20-21 August 1998, S. 181–184
- [TP08] TEIXEIRA, Francisco C. ; PASCOAL, Antonio M.: Geophysical navigation of autonomous underwater vehicles using geomagnetic information. In: *Proceedings of the 2nd IFAC Workshop on Navigation, Guidance and Control of Underwater Vehicles NGCUV 2008*. Killaloe, Ireland, 8-10 April 2008, S. n/a
- [WGS00] NATIONAL IMAGERY AND MAPPING AGENCY: World Geodetic System 1984. 2000 (NIMA TR8350.2 3rd Edition). – Forschungsbericht

- [Win08] WINTER, Kai: *QMapControl - Ein Qtopia-Widget für Kartenanwendungen auf mobilen Geräten*, Fachhochschule Wiesbaden, Diplomarbeit, 2008
- [YBJ⁺07] YOERGER, Dana R. ; BRADLEY, Albert M. ; JAKUBA, Michael ; GERMAN, Christopher R. ; SHANK, Timothy ; TIVEY, Maurice: Autonomous and remotely operated vehicle technology for hydrothermal vent discovery, exploration, and sampling. In: *Oceanography* 20 (2007), Nr. 1, S. 152–161
- [YXY09] YAO, Yao ; XU, Demin ; YAN, Weisheng: Cooperative Localization with Communication Delays for MAUVs. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems ICIS 2009*. Shanghai, China, 20–22 November 2009, S. 244–249

